


FONDO PIZZOFALCONE

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE

Corbeil. — Typographie et Galvanoplastie de Crété.

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE

PRÉCÉDÉ

DE NOTIONS DE MÉCANIQUE

ET

SUIVI DE PROBLÈMES

PAR

A. BOUTAN
Professeur de physique au Lycée St-Louis.

J. CH. D'ALMEIDA
Professeur de physique au Lycée Napoléon.

AVEC FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE



PARIS

DUNOD, ÉDITEUR,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

Quai des Augustins, 49

M DCCC LXI



COURS ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

1. L'observation des phénomènes qui se produisent spontanément dans la nature, l'examen attentif des réactions obtenues dans les laboratoires nous montrent que les corps sont susceptibles d'éprouver, suivant les cas, deux sortes de modifications. Tantôt le changement observé ne porte que sur quelques-unes seulement des propriétés de la substance que l'on étudie, et le plus souvent alors, celle-ci reprend ses qualités premières quand la cause qui a provoqué le changement cesse d'agir. Tantôt l'altération est plus profonde; le corps se transforme complétement, en donnant naissance à un ou plusieurs produits nouveaux possédant des propriétés distinctes. L'étude des phénomènes appartenant au premier groupe forme l'objet de la physique ; l'étude des autres rentre dans le domaine de la chimie.

2. **Phénomènes physiques.** — Quelques exemples feront bien comprendre la distinction que nous venons d'indiquer.

Un barreau d'argent placé dans un foyer de chaleur augmente de volume; plus fortement chauffé, il devient liquide. Le métal a donc, par le fait seul de son échauffement, acquis des propriétés nouvelles. C'était d'abord une barre rigide qui eût offert une grande résistance à la séparation de ses diverses parties; c'est, maintenant, une masse fluide dont les particules ont acquis une grande mobilité. Pourtant, la nature de la substance n'est pas changée, c'est toujours de l'argent, et. si l'on retire le métal fondu du foyer où il était plongé, il reprendra bientôt, de lui-même, son état et son volume primitifs.

Autre exemple : Un bâton de verre frotté avec de la laine attire les corps légers, une tourmaline placée dans le feu attire des parcelles de cendre qui viennent adhérer à sa surface, un fragment de spath d'Islande comprimé entre les doigts exerce une action attractive du même genre. Voilà une propriété nouvelle communiquée aux trois substances, sans qu'elles aient cessé de demeurer ce qu'elles étaient d'abord : du verre, une tourmaline, du spath d'Islande. Tel est précisément le genre de modifications que nous étudions en physique.

3. **Phénomènes chimiques.** — Au lieu de cela, chauffons du plomb fondu au contact de l'air, nous le voyons se convertir peu à peu en une matière solide pulvérulente qui n'est plus du plomb, mais une combinaison de plomb et d'oxygène, le *massicot*. Une pierre calcaire soumise à l'action énergique de la chaleur diminue de poids en perdant de l'acide carbonique qui se répand dans l'air ambiant, et il reste à sa place un bloc de chaux vive. Dans l'une et l'autre expérience, la substance employée, plomb ou pierre calcaire, a subi une transformation complète et définitive. Il y a eu là production de phénomènes chimiques.

4. **Observation et expérience.** — Le physicien et le chimiste ne se contentent pas toutefois de la simple constatation des faits. Leurs vues sont plus élevées. Ils tendent de tous leurs efforts à découvrir la relation qui unit entre eux ces faits au premier abord isolés et sans liaison apparente, afin de classer dans un même groupe tous ceux qui se rattachent à une cause commune. En un mot, le but principal poursuivi par le savant dans ses recherches, c'est la découverte des lois générales qui régissent les phénomènes.

5. Pour atteindre ce but, il a recours à l'observation et à l'expérience : à l'observation, c'est-à-dire à l'examen scrupuleux et détaillé des faits tels qu'ils se montrent à lui sans qu'il en ait provoqué l'apparition; à l'expérience, c'est-à-dire à la manifestation de phénomènes nouveaux, dans des conditions bien définies, qui naturellement ne se seraient peut-être jamais présentées. C'est en prenant ainsi les faits comme point de départ essentiel de toute théorie, c'est en interrogeant d'une manière assidue la nature par l'expérience, que la science moderne a pu accomplir, en peu d'années, d'immenses progrès.

6. **Division du cours.** — Ce cours, consacré spécialement à l'étude de la physique, sera divisé en six livres : I. Généralités sur les corps et sur les forces. — II. Pesanteur. — III. Chaleur. — IV. Électricité et Magnétisme. — V. Acoustique. — VI. Lumière.

LIVRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES CORPS ET SUR LES FORCES.



CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES CORPS.

7. **Divisibilité de la matière.** — Une expérience journalière nous apprend qu'un corps, quel qu'il soit, peut être divisé en plusieurs fragments. Ceux-ci, à leur tour, étant susceptibles d'un nouveau fractionnement, on n'est arrêté dans cette division de la matière en parties de plus en plus petites que par l'imperfection des instruments qui servent à l'observer et par la limite de sensibilité de nos organes des sens. Ainsi, la divisibilité de la matière considérée comme fait pratique est nécessairement limitée. Mais une question plus délicate s'impose à notre esprit. En admettant que nos sens et nos instruments se perfectionnassent de plus en plus, arriverait-on dans ce partage des corps en fragments de plus en plus petits à un arrêt nécessaire? L'interprétation la plus simple des lois qui président aux combinaisons chimiques nous conduit à admettre que les corps sont formés de particules insécables ou *atomes* qui résistent à toutes les actions physiques et chimiques qui tendraient à les fractionner. Mais c'est là une pure conception de l'esprit dont il serait impossible de démontrer la réalité, et à laquelle il faut se garder d'attribuer le même degré de vérité qu'à un fait ou qu'à une loi physique.

Nous emploierons désormais le mot *molécules* pour désigner les parties très-petites de matière dont le groupement forme les corps, et cela, sans faire aucune hypothèse sur leur constitution véritable.

8. **Compressibilité. Porosité.** — Si l'existence des atomes est hypothétique, on peut du moins affirmer avec toute certitude que les molécules dont la réunion forme les corps, ne se touchent pas les unes les autres; elles sont séparées par des intervalles qu'on nomme *pores*. La preuve en est dans la propriété, commune à tous les corps, de diminuer de volume, de se comprimer, quand on les soumet à une action mécanique ou à un abaissement de température. La *compressibilité*, propriété

générale de la matière, suffit seule à démontrer l'existence de la porosité. Car, si un corps est susceptible de prendre un moindre volume, par une cause quelconque, il faut, ou que ses molécules se soient rapprochées, et dès lors, leur écart primitif se trouve démontré, ou qu'elles se soient pénétrées mutuellement les unes les autres pour occuper simultanément la même portion d'espace; hypothèse tout à fait inacceptable comme contraire à l'idée même de la matière, qui, pour nous, est essentiellement étendue et impénétrable.

Il faut se garder de confondre avec les pores véritables ces cavités accidentelles, ces lacunes qui existent dans certains corps : la pierre ponce, l'éponge de platine, le bois. Si une lame de cuir se laisse traverser par du mercure qu'on presse sur l'une de ses faces, il ne faut pas donner ce fait comme une preuve de la porosité; il montre seulement que le cuir est percé de trous nombreux (visibles d'ailleurs à la loupe), là où se trouvaient implantés les poils que l'opération du tannage a détruits. Les pores sont des intervalles intermoléculaires qui échappent à l'œil, même quand on emploie le secours des instruments les plus grossissants.

9. Élasticité. — En même temps que les corps sont compressibles et, par suite, poreux, ils sont encore *élastiques;* c'est-à-dire que, lorsque, par l'effet d'une action mécanique, ils ont subi une déformation peu considérable, ils reprennent spontanément leur volume initial aussitôt que la force étrangère cesse d'agir. Un ressort d'acier qu'on fléchit, une bille d'ivoire qu'on comprime, fournissent, par leur retour à la forme première, des preuves évidentes pour tout le monde de cette propriété d'élasticité commune à tous les corps. Remarquons, toutefois, que, lorsqu'un solide (une barre de fer, par exemple) est soumis à une traction ou à une compression, il est indispensable que l'écart moléculaire ainsi déterminé ne soit pas trop considérable; sans cela, la barre, quand l'action cesse de s'exercer, au lieu de reprendre son volume premier, acquiert définitivement une forme nouvelle (*): on dit, dans ce cas, que la *limite d'élasticité* a été dépassée. Il est même possible, en augmentant graduellement la grandeur de la traction ou de la compression, de produire une série d'états d'équilibre moléculaire successifs, jusqu'à ce qu'enfin la rupture de la barre se détermine.

10. Trois états de la matière. — État solide. — Un même corps, tout en conservant sa nature chimique, peut se présenter sous trois états différents : état *solide*, état *liquide*, état *gazeux*.

Dans les solides — métaux, pierres, etc. — les particules sont solidaires les unes des autres; le corps a une forme qui lui est propre et qui ne peut être modifiée que par un certain effort capable de changer les distances

(*) Les molécules se sont établies dans un état d'équilibre stable, persistant, et néanmoins distinct de l'équilibre primitif.

ou les positions relatives des molécules. En outre, l'équilibre moléculaire du corps solide est toujours stable, c'est-à-dire que, si l'on déplace d'une petite quantité quelques-unes des parties qui le constituent, celles-ci reviennent d'elles-mêmes à leur position primitive d'équilibre. Enfin, l'élasticité, dans les corps solides, peut être mise en jeu par trois procédés : la pression, la traction et la flexion.

Tels sont les faits qu'indique l'observation. — On les interprète de la manière la plus simple, en admettant l'existence de forces moléculaires, l'une attractive, la cohésion, l'autre répulsive; leur grandeur dépend de la distance actuelle des molécules, et aussi, dans les corps solides, de la position relative de ces mêmes molécules. Elles augmentent toutes les deux, quand la distance diminue; seulement, la force répulsive varie d'intensité plus rapidement que la cohésion. En effet, quand on comprime un corps et que, par suite, on rapproche ses particules, un équilibre momentané se produit, tant que dure l'action de la force étrangère qui exerce une pression sur ce corps; donc, les forces moléculaires ont éprouvé, dans leur grandeur, une variation telle qu'il y a eu finalement, dans l'effet répulsif, un accroissement compensant exactement l'effet inverse de la pression. De même, quand on exerce une traction sur le solide, la manifestation d'un équilibre nouveau est la preuve que la force répulsive a décru plus rapidement que la cohésion, car il faut, pour détruire l'effort de traction et en limiter les effets, un accroissement final correspondant des forces moléculaires qui ait lieu dans le sens de la cohésion.

11. Fluides. — Dans les fluides qui comprennent les liquides et les gaz, les molécules sont parfaitement mobiles; elles peuvent glisser presque sans frottement les unes sur les autres. Le moindre effort suffit pour les séparer. Le fluide n'a point une forme à lui comme le solide, il prend immédiatement celle du vase qui le renferme.

12. État liquide. — Les liquides conservent pourtant une certaine cohésion entre leurs molécules. Voyez une gouttelette de mercure G (*fig.* 1) : posée sur une lame de verre horizontale L, elle prend d'elle-même la forme sphérique, et la conserve malgré l'action de la pesanteur qui tend à disjoindre ses diverses parties et à les étaler à la surface de la lame. Plongez dans l'eau une baguette de verre, et retirez-la ensuite : une goutte liquide G (*fig.* 2) restera suspendue à son extrémité inférieure. Or, si la partie inférieure de la goutte ne se sépare pas de la partie supérieure pour obéir à la pesanteur qui tend à l'entrainer à la surface de la terre, c'est qu'il existe, entre les particules qui la constituent, des actions attractives dont la résultante maintient l'agrégation moléculaire malgré l'action inverse de la pesanteur.



Fig. 1.



Fig. 2.

La mobilité parfaite des particules, que nous donnons comme caractéristique des fluides, n'est pas complétement réalisée dans les liquides. On trouve encore chez eux une certaine viscosité qui se manifeste par la nécessité où l'on est d'exercer un certain effort de grandeur finie pour faire glisser une tranche liquide sur la tranche voisine qui la supportait : mais nous verrons bientôt, au chapitre de l'Hydrostatique, que, pour la plupart des liquides, cette influence perturbatrice est négligeable.

Les liquides sont très-peu compressibles; leur élasticité peut surtout être développée par voie de pression. D'ailleurs, quelle que soit l'intensité de la force qui les comprime, ils reprennent toujours leur volume initial quand la force a cessé son action.

13. **État gazeux**. — Les gaz ont de commun avec les liquides la mobilité et l'indépendance des molécules, leur élasticité est parfaite; mais ils sont beaucoup plus compressibles. Ils possèdent, en outre, la propriété d'expansibilité qui fait qu'un gaz, introduit dans un vase, se répand bientôt dans tout l'espace qui lui est offert, et exerce contre les parois une pression permanente qui constitue ce qu'on nomme sa *force élastique*. L'intensité de cette force répulsive, qui tend sans cesse à écarter les molécules, ne dépend que de la température et du volume occupé par le corps gazeux. Les expériences qui servent à prouver l'existence de ces propriétés, seront décrites dans le chapitre IV de la Pesanteur.

CHAPITRE II.

GÉNÉRALITÉS SUR LES FORCES.

14. **Forces**. — On appelle *force* toute cause capable de déterminer le mouvement d'un corps ou de modifier un mouvement déjà existant.

Les forces que nous voyons intervenir dans la production des phénomènes naturels sont très-variables par leur origine. Les plus importantes sont : les actions moléculaires, dont nous venons de dire un mot à propos des trois états de la matière; les agents physiques déjà nommés (pesanteur, chaleur, électricité, lumière), dont l'étude fait le principal objet de ce cours; l'action des moteurs animés (l'homme, le cheval, etc.); le vent et les cours d'eau qui doivent à la pesanteur leur aptitude à jouer le rôle de forces; l'élasticité des ressorts et les frottements dont les effets se confondent avec ceux des forces moléculaires.

15. **Unité de force**. — Quelle que soit leur origine, les forces sont des

grandeurs mesurables qu'il importait d'évaluer numériquement. On a choisi, comme unité de force, le poids, à Paris, d'un décimètre cube d'eau distillée prise à la température du maximum de densité; c'est le *kilogramme*. Seulement on ne voit pas, au premier abord, comment il est possible de comparer à un poids les intensités de forces dont la manière d'agir est si différente. Cette question a été résolue par l'emploi d'appareils fort simples : les *dynamomètres*.

16. Dynamomètres. — N'est-il pas évident, si deux forces agissant successivement sur un même ressort d'acier lui font subir la même flexion, sans toutefois dépasser la limite de son élasticité, n'est-il pas évident que ces deux forces pourront être considérées comme égales en intensité? Tel est le principe des dynamomètres. Parmi les nombreux instruments de ce genre qui sont journellement employés, nous décrirons de préférence le dynamomètre de M. Poncelet, à cause de sa grande simplicité et de son emploi fréquent pour mesurer de grands efforts. Il a servi notamment à étudier le tirage des voitures, où l'on utilise, comme moteur, l'action musculaire des animaux.

17. Dynamomètre de M. Poncelet. — Le dynamomètre de M. Poncelet, perfectionné par M. Morin, se compose de deux lames d'acier trempé, R, R' (*fig.* 3), tout à fait semblables, disposées parallèlement l'une à l'autre, et

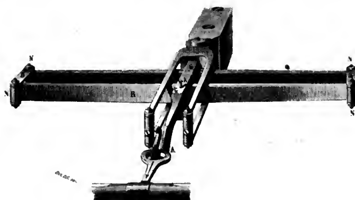


Fig. 3.

portant à leurs extrémités des nœuds d'articulation N traversés à frottement doux par des boulons que maintiennent, à l'aide d'écrous, quatre lames B nommées brides. Par ce mode d'accouplement, les lames et les brides forment, à chaque bout, une sorte de rectangle dont les côtés verticaux constitués par les nœuds d'articulation peuvent librement tourner autour de leur axe de figure. La flexion de chaque ressort s'opère alors séparé-

ment, comme si ce ressort était seul. Veut-on mesurer l'effort exercé par un animal dans le tirage d'une voiture? Une griffe postérieure G, reliée à la voiture, fixe invariablement le milieu de la lame R'; la griffe antérieure G saisit le milieu de la lame R et se rattache par le crochet A à la corde ou à la chaîne sur laquelle agit le moteur. Un crayon K, porté par cette dernière griffe, trace une ligne droite sur une feuille de papier placée au-dessous de lui. La longueur de cette ligne permet d'estimer la flexion totale subie par le système des deux lames, au moment où s'exerce l'effort du moteur. Enfin, deux arrêts placés en avant de R et rattachés à la partie fixe du dynamomètre, limitent la flexion des ressorts, afin que, dans aucun cas, il ne puisse y avoir aucune altération permanente produite dans l'état moléculaire des lames d'acier. Le calcul et l'expérience ont montré que, dans un pareil instrument, les accroissements de flexion sont proportionnels aux accroissements de traction. Dans un des dynamomètres employés par M. Morin, à chaque augmentation de 10 kilog. dans la grandeur de l'effort, correspondait une augmentation de $1^{mm},25$ dans la flexion de la lame élastique. Quand le rapport de l'accroissement de la force à celui de la flexion est ainsi connu, il devient facile de déduire dans chaque cas, de la longueur de la ligne tracée par le crayon, la valeur en kilogrammes de la force employée.

On remarquera que les lames R et R' ne sont pas prismatiques; le calcul a indiqué qu'en donnant à leurs faces externes la courbure parabolique, la résistance à la rupture était la même pour tous les points de chaque lame, et qu'en outre, la flexion, pour la même force employée, était double de celle qu'auraient éprouvée des lames de même nature, ayant la même épaisseur dans toute leur étendue.

18. Pour qu'une force soit complétement déterminée, il ne suffit pas d'évaluer son intensité, il faut connaître en outre sa direction et son point d'application. Nous verrons comment ces dernières quantités peuvent être estimées, dans le cas des diverses forces dont nous avons à nous occuper ici.

19. **Mouvement uniforme.** — Les forces servant à produire ou à modifier le mouvement des corps, donnons maintenant quelques notions précises sur les principaux mouvements que nous aurons à étudier.

Un corps est dit animé d'un mouvement uniforme lorsque, à toutes les époques de son déplacement, il parcourt des espaces égaux dans des temps égaux. L'espace, toujours le même, parcouru dans l'unité de temps se nomme *vitesse*. En désignant cette vitesse par v et appelant e le déplacement total du mobile pendant le temps t, on aura l'expression générale $e=vt$ (1) dans laquelle e est habituellement exprimé en mètres et t en secondes.

20. **Mouvement varié.** — Lorsqu'un corps parcourt des espaces inégaux dans des temps égaux, son mouvement est *varié*. Cela revient à dire que, dans ce cas, la vitesse du mobile change à chaque instant. Quand

cette vitesse est croissante avec le temps, le mouvement est *accéléré;* si elle diminue lorsque le temps augmente, le mouvement est *retardé*. Qu'appellera-t-on vitesse du corps, dans un mouvement de ce genre, à une époque déterminée? Prenons un cas simple : supposons le mobile animé d'un mouvement d'entraînement rectiligne; il est parvenu en A (*fig*. 4), à l'époque t, par le fait du mouvement varié qu'il possède, et c'est sa vitesse à cet instant qu'il s'agit d'obtenir.



Fig. 4.

Si le corps se mouvait encore, de son mouvement varié, à partir de A, pendant un temps t_1, il arriverait en B, par exemple, ayant parcouru l'espace $AB = e_1$. Or, on comprend qu'en lui donnant une vitesse convenable, qui demeurera constante, le corps eût pu parcourir le même espace, dans le même temps, d'un mouvement uniforme. Cette vitesse eût dû être, dans ce cas, égale à $\frac{e_1}{t_1}$ (19). Ce n'est pas là la vitesse cherchée en A, c'est une vitesse intermédiaire de A en B; mais la première différera d'autant moins de la seconde que l'accroissement de temps t_1, pendant lequel on considère la continuation du mouvement, sera plus petit, et ce sera à la limite, lorsque t_1 aura décru jusqu'à zéro, que la vitesse moyenne $\frac{e_1}{t_1}$ et la vitesse cherchée se confondront. Nous définirons donc la vitesse, dans un mouvement varié : *la limite du rapport de l'accroissement de l'espace à l'accroissement du temps*.

21. Nous mesurerons par l'expérience la grandeur de cette vitesse, toutes les fois qu'il nous sera possible de supprimer, à l'époque voulue, l'action de la force. Le mouvement deviendra dès lors uniforme, car le corps ne se mouvra plus qu'en vertu de sa vitesse acquise; et ce sera l'espace parcouru dans l'unité de temps, ou la vitesse de ce mouvement uniforme, qui sera la vitesse cherchée.

22. Mouvement uniformément varié. — Accélération. — Parmi les mouvements variés qui diffèrent l'un de l'autre par la loi de variation de la vitesse, il en est un que nous aurons à étudier plus spécialement, c'est celui dans lequel la vitesse s'accroît de quantités égales, après des temps égaux; on l'appelle *mouvement uniformément varié*. L'accroissement constant de vitesse dans l'unité de temps se nomme l'*accélération*. Si donc on désigne par v la vitesse au bout du temps t, par a l'accélération; lorsqu'il n'y a pas de vitesse initiale, la vitesse sera, d'après la définition de l'accélération, a au bout du temps 1, $2a$ au bout du temps 2..., at au bout du temps t.

On aura, en général, $v = at$. Cette expression n'est autre chose que la définition même du mouvement uniformément varié, indiquant que, dans ce mouvement, *la vitesse croît proportionnellement au temps*.

23. Principes fondamentaux de la mécanique. — L'étude détaillée des mouvements rentrant essentiellement dans le domaine de la mécanique, notre intention ne saurait être de donner ici, sur ce sujet, de grands développements. Nous nous bornerons à énoncer les principes fondamentaux qui servent de base à cette science, parce que leur connaissance préalable est nécessaire pour l'explication des phénomènes physiques. Ces principes représentent comme de grands aperçus synthétiques concernant les mouvements et les forces qui n'ont pu être formulés qu'à la suite des grands progrès accomplis par les sciences d'observation.

24. 1er *Principe.* — *La matière est inerte :* c'est-à-dire qu'elle ne peut d'elle-même changer ni son état de repos ni son état de mouvement. — L'inertie de la matière ne peut se prouver directement ; mais on est conduit à l'admettre par voie d'induction. Une bille qu'on fait rouler sur un plan horizontal à surface rugueuse s'arrête au bout de peu de temps. La même surface est-elle rendue plus lisse ? est-elle constituée, par exemple, par une lame de glace bien polie ? le mouvement de la bille persiste beaucoup plus longtemps. Nous sommes donc amenés à conclure que si l'on pouvait supprimer complétement toutes les aspérités et donner à la surface un poli parfait, la bille se mouvrait indéfiniment. Une pierre qu'on lance dans une direction quelconque se mouvrait indéfiniment en ligne droite et d'un mouvement uniforme, si aucune force n'intervenait. Mais la résistance de l'air qu'elle traverse diminue à chaque instant la vitesse, et en outre, l'attraction exercée par le globe terrestre tend sans cesse à la rapprocher du centre de la terre. Ce sont ces deux forces qui, donnant à la pierre un mouvement varié, lui font parcourir une trajectoire curviligne et la ramènent bientôt à la surface du sol. Il est bien entendu que l'idée d'inertie n'exclut pas la faculté qu'ont les molécules des corps d'agir les unes sur les autres ; les phénomènes de combinaison chimique sont là pour prouver la possibilité de ces actions mutuelles. Mais une molécule matérielle prise isolément ne peut exercer d'action qui modifie son propre mouvement.

25. 2e *Principe.* — *L'effet d'une force sur un point matériel est tout à fait indépendant du mouvement antérieurement acquis par ce point.* — Cet effet demeure le même, que le mobile parte du repos ou qu'il possède déjà une certaine vitesse. Comprenons d'abord la signification exacte de cet énoncé, dans le seul cas qui nous intéresse, celui où la force est constante. Il veut dire que si, par l'effet seul de la vitesse acquise, le point matériel était allé dans le temps t de A en B (*fig.* 5) : si par l'effet de la force agissant seule, que nous supposerons constante en grandeur et en

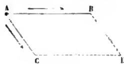


Fig. 5.

direction, il était allé de A en C, au bout du temps t; ce même mobile soumis à l'influence simultanée de la vitesse acquise et de la force, aura parcouru, parallèlement à AB, un espace égal à AB, parallèlement à AC, un espace égal à AC; il sera donc, à l'époque t, à l'extrémité D de la diagonale du parallélogramme construit sur les droites AB et AC, et nous affirmons qu'il doit occuper cette position sans rien préjuger sur la forme de la trajectoire qu'il a suivie pour aller de A en D.

La vérité de ce principe peut s'établir par la vérification expérimentale de ses conséquences. L'une des plus importantes et qui sera démontrée par l'expérience dans le chapitre de la Pesanteur (61), c'est qu'*une force constante engendre toujours un mouvement uniformément varié.* La force constante agit, il est vrai, d'une manière continue; mais supposons, pour un instant, qu'elle n'agisse que par saccades et chaque fois pendant un temps fini, mais très-court; le mobile qui part du repos aura pris au bout du temps 1 une certaine vitesse a due à la première action de la force. S'il est vrai que l'effet de la force soit indépendant du mouvement antérieurement acquis par le point matériel; au commencement du temps 2, la force agira de nouveau sur le mobile, comme lorsqu'il partait du repos; et, comme elle est constante, après le temps 2, le mobile aura acquis par la seconde action de la force une nouvelle vitesse a qui, s'ajoutant à la précédente, puisqu'elle est dirigée dans le même sens, donnera une vitesse totale $2a$. Par conséquent, au bout du temps t, on aura la relation générale $v = at$, définition d'un mouvement uniformément varié (22). Ce résultat, étant indépendant de la grandeur de l'intervalle de temps qui sépare deux impulsions consécutives de la force, sera donc encore vrai, quand la force agira d'une manière continue.

26. 3e *Principe.* — *Lorsque plusieurs forces qui n'ont aucune dépendance mutuelle agissent simultanément sur un même point matériel, les effets de ces forces coexistent sans se modifier l'un l'autre.* — L'énoncé qui précède a le sens suivant : un système de points matériels étant en repos, supposons que l'un d'eux m soit soumis, à un moment donné, à l'action de la force F; m prendra un certain mouvement par rapport au système immobile; eh bien! ce mouvement relatif demeurera exactement le même si le système de points matériels jusque-là en repos et le point matériel m toujours déplacé par F se trouvent à la fois sollicités par une nouvelle force F'. C'est là ce qui fait dire que sur le point m les effets de deux forces F et F' coexistent sans se modifier. Au reste, nous n'avons, en physique, à considérer ce principe que dans un cas particulier, à savoir : lorsque plusieurs forces constantes en grandeur et en direction agissent simultanément sur un mobile. Il nous fournit alors une conséquence vérifiable par l'expérience; c'est le théorème de la proportionnalité des forces aux accélérations qu'elles produisent.

27. Proportionnalité des forces aux accélérations. — *Deux forces constantes, en agissant successivement sur un même point matériel, lui communiquent des accélérations qui sont entre elles comme ces forces.*

Pour prouver que ce théorème est la conséquence du troisième principe, supposons que les intensités des deux forces considérées soient dans le rapport de 3 à 5 ; alors la première pourra être remplacée par 3 forces égales à la commune mesure, lesquelles agiront simultanément et dans la même direction sur ce point matériel. Si le troisième principe est vrai, chaque force produisant son effet comme si elle était seule, l'accélération totale du point matériel ou l'accroissement de vitesse dans l'unité de temps (22) sera la somme des trois accélérations égales communiquées par chacune des trois forces, ou le triple de l'accélération que donne la force servant de commune mesure. Par la même raison, la seconde force pouvant être remplacée par 5 petites forces égales entre elles et aux précédentes, l'accélération totale du point matériel sera égale à 5 fois l'accélération que donne la force servant de commune mesure. Donc, les accélérations sont dans le même rapport $\frac{3}{5}$ que les forces, et l'on a en général, F et F' représentant les intensités des forces, a et a' les accélérations correspondantes, $\frac{F}{F'} = \frac{a}{a'}$ (1).

Cette conséquence sera vérifiée par l'expérience dans le Livre suivant, à l'aide de la machine d'Atwood.

28. Masse d'un corps. — Densité. — De (1) nous déduirons

$$\frac{F}{a} = \frac{F'}{a'} = \frac{F''}{a''} \dots = \text{constante};$$

c'est-à-dire que ce qui caractérise le point matériel considéré, au point de vue des mouvements que les forces peuvent lui communiquer, c'est la valeur constante du rapport de la force qui agit sur lui à l'accélération que cette force lui communique. C'est là un coefficient numérique représentant l'un des caractères propres au corps et qu'on nomme sa *masse*.

Si la force considérée est *la résultante des actions que la pesanteur exerce sur ses diverses molécules ou le poids* p *du corps* et g l'accélération due à la pesanteur, la masse m aura pour expression,

$$m = \frac{p}{g}, \qquad (2)$$

d'où cette définition souvent usitée de la masse d'un corps : c'est *le rapport du nombre abstrait qui exprime le poids de ce corps à celui qui représente l'accélération de la pesanteur.* Si on change de lieu à la surface de la terre,

les deux termes du rapport ont des valeurs différentes, mais leur quotient demeure constant.

On nomme *densité d'un corps :* la *masse de ce corps sous l'unité de volume.*

Si pour un premier point, on a $\frac{F}{a} = m$; pour un second, de masse m' et sur lequel agirait une autre force F' produisant l'accélération a', on aura

$$\frac{F'}{a'} = m', \text{ d'où } \frac{F}{F'} = \frac{am}{a'm'}. \tag{3}$$

Or, d'après la formule connue $v = at$, le rapport des accélérations égale le rapport des vitesses acquises au bout du même temps quand il n'y a pas de vitesse initiale, car on aura pour le second mobile $v' = a't$, d'où $\frac{a}{a'} = \frac{v}{v'}$. Substituant dans (3) à $\frac{a}{a'}$ sa valeur $\frac{v}{v'}$, il vient $\frac{F}{F'} = \frac{mv}{m'v'}$.

On peut donc énoncer ce nouveau théorème : *Les forces constantes sont entre elles comme les produits des masses des mobiles qu'elles sollicitent par les vitesses qu'elles leur communiquent au bout du même temps.* De là un nouveau moyen de mesurer une force par l'évaluation numérique de ma ou de mv; v sera exprimé en mètres, et m sera le quotient du poids du mobile par l'accélération de la pesanteur ; le produit exprimera l'intensité de la force en kilogrammes.

Si l'on fait dans (3) $a = a'$ on a $\frac{F}{F'} = \frac{m}{m'}$; donc, *deux forces constantes sont entre elles comme les masses des mobiles auxquels elles communiquent la même accélération;* d'où cette conséquence : *dans le même lieu, les poids des corps sont proportionnels à leurs masses.*

Si on fait dans (3) F = F' on a $am = a'm'$; donc, *lorsqu'une même force agit successivement sur des mobiles de masses différentes, les accélérations communiquées sont en raison inverse des masses.* C'est là (nous le verrons bientôt) le point de départ de la machine d'Atwood.

29. 4° *Principe.* — *La réaction est toujours égale et de sens contraire à l'action.* — C'est-à-dire que, dès lors qu'une force émanant d'un système de points matériels agit sur un corps, elle fait apparaître immédiatement une force égale et de sens contraire réagissant sur le système en question et qu'on nomme la *réaction*. Ainsi je presse avec la main sur une table ; les molécules superficielles se rapprochent des molécules sous-jacentes, et la diminution de leur distance détermine un accroissement des forces répulsives égal et de sens contraire à la pression exercée, si bien que ma main se trouve comprimée avec la même force que la table. Une conséquence de ce principe, que vérifie l'observation des faits les plus vulgaires, c'est que lorsque plusieurs corps forment un système capable de

se déformer, les actions mutuelles des corps de ce système sont sans influence sur le mouvement de son centre de gravité. Un waggon de chemin de fer est immobile sur les rails; que des hommes placés dans son intérieur pressent fortement de dedans en dehors les parois du waggon : ils ne le déplaceront pas d'un millimètre, malgré sa grande mobilité. De même ils ne changeront en rien la direction qu'il suit lorsque ce waggon sera déjà en mouvement ; au contraire, un seul homme placé sur la voie peut, en poussant, faire marcher ce waggon, parce que le point d'appui que ses pieds trouvent sur le sol fait apparaître une force nouvelle étrangère au système mobile, le *frottement*. On comprend en effet que lorsque les actions mutuelles interviennent seules, la réaction de la paroi étant égale et de sens contraire à l'effort exercé, celui-ci ne puisse avoir aucune influence sur le mouvement commun du système, car il est à chaque instant équilibré. Au reste, nous pourrons, dans le chapitre de l'Hydrostatique, en nous fondant sur le principe d'Archimède, rendre manifeste par une expérience cette égalité de l'action et de la réaction.

30. **Représentation géométrique des forces.** — On est convenu de représenter géométriquement une force par une ligne droite dont la direction est celle de la force et dont la longueur est proportionnelle à son intensité. On arrive alors, par des constructions graphiques, à résoudre aisément le problème de la composition et de la décomposition des forces. Nous donnerons ici seulement les énoncés des théorèmes principaux dont nous avons besoin pour l'étude de la physique. Leur démonstration se trouve dans les traités de mécanique.

31. **Composition des forces concourantes.** — Lorsque deux forces F et F' (*fig.* 6), faisant un angle entre elles, agissent sur un même point *m*, on comprend qu'une force unique, qu'on nomme leur *résultante*, puisse communiquer au point matériel le même mouvement dans la même direction que les deux forces réunies. Or, on démontre que : *cette résultante* mB *est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme, construit sur les droites* mA, mB, *qui représentent en grandeur et en direction les forces* F *et* F' *dites les composantes.*

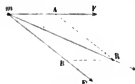
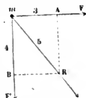


Fig. 6.

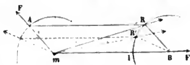
Si, par exemple, les forces F et F' (*fig.* 7) ont pour intensités respectives **3** kilogrammes et **4** kilogrammes et qu'elles fassent entre elles un angle droit ; le parallélogramme *m*ARB devient un rectangle, et la diagonale qui donne l'intensité de la résultante devient l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont les côtés de l'angle droit ont pour longueur **3** et **4** ; cette résultante aura donc pour expression $\sqrt{3^2+4^2} = 5$; et tout se

passera comme si le point m était soumis à une force unique de 5 kilogrammes, agissant dans la direction mR.

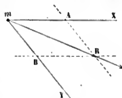

Fig. 7.

Dans le triangle mBR (*fig.* 6), on a $mR < mB + BR$; mais si les forces, conservant la même grandeur, l'angle AmB qu'elles font entre elles va en décroissant jusqu'à zéro, mR augmente jusqu'à ce qu'il devienne égal à $mB + BR$ ou $mB + mA$; car, à ce moment, le triangle mBR se réduit à une ligne droite : donc, *deux forces agissant dans le même sens, sur un même point matériel, ont une résultante égale à leur somme.*

Si les deux forces restant constantes (*fig.* 8), leur angle va croissant jusqu'à 180°; on voit que le triangle mRB se déforme en conservant les deux côtés mB, BR de même longueur; seulement mR décroît à mesure que l'angle mRB va croissant. A la limite, quand cet angle égale 180°, mR devient égal à $mI = mB - BR = mB - mA$. Donc, *la résultante de deux forces appliquées en un même point et agissant en sens contraire est égale à leur différence.* Si les deux forces sont égales entre elles, leur résultante est nulle, et le point m doit demeurer en équilibre; ce dernier résultat peut être considéré comme évident *à priori*.


Fig. 8.

32. Décomposition d'une force en deux autres, suivant des directions données. — Réciproquement, étant donnée une force unique représentée par mR (*fig.* 9); on pourra toujours la remplacer par deux composantes produisant le même effet, suivant deux directions données mX, mY. Il suffira de mener par le point R des parallèles aux deux directions choisies; les points de rencontre A et B de ces parallèles avec mX et mY fixeront les intensités mA et mB des deux composantes.


Fig. 9.

33. Composition des forces parallèles. — Lorsque deux forces parallèles F, F' dirigées dans le même sens sont appliquées à deux points différents m, m' d'un même corps solide, *la résultante de ces deux forces est : 1° parallèle à leur direction ; 2° égale à leur somme ; 3° son point d'application partage la droite mm' qui joint les points d'application des forces en deux parties inversement proportionnelles aux forces*, de façon qu'on a $\frac{m'A}{mA} = \frac{mP}{m'Q}$. Si, par exemple, les forces F et F' (*fig.* 10) ont pour intensités respectives 3 kilogrammes et 5 kilogrammes, si la distance mm' de leur point d'application est de 16 centimètres, l'intensité de la résultante

est égale à 8 kilogrammes : elle agit dans le sens des deux forces et parallèlement à leur direction, et son point d'application A se trouve à 6 centimètres du point m' et par suite à 10 centimètres du point m. Tout se passe donc comme si les forces F et F' étant supprimées, une force unique de direction AR, ayant pour intensité 8 kilogrammes, agissait au point A du corps considéré. On comprend alors que, si en A est placé d'avance un support fixe, un point d'appui, la résultante R se trouvera détruite par la résistance du support et le corps demeurera en équilibre sous l'action des forces F et F' qui le sollicitent.

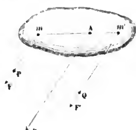


Fig. 10.

34. Si les forces parallèles sont de sens contraire, la résultante R (*fig.* 11). 1° *est dans le sens de la plus grande;* 2° *est égale à leur différence;* 3° *son point d'application* A *est sur le prolongement de la droite mm', et tel que ses distances aux points d'application des deux composantes sont en raison inverse des intensités respectives de ces forces.* On a, par suite, $\frac{m'A}{mA} = \frac{mP}{m'Q}$. Si les deux forces F' et F sont égales en intensité, leur résultante F'—F est nulle; par suite, il n'y a pas de force unique capable de faire équilibre à un pareil système. On le nomme *couple;* et son effet est de communiquer un mouvement de rotation autour d'un point fixe, au corps auquel il est appliqué.

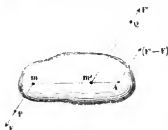


Fig. 11.

35. Lorsqu'on aura un nombre quelconque de forces parallèles appliquées aux différents points d'un même corps, la résultante générale sera égale à leur somme algébrique, et son point d'application s'obtiendra en composant les deux premières F, F' (*fig.* 12), puis leur résultante r avec la troisième F'', et ainsi de suite. On aura donc successivement :

$$\frac{m'a}{ma} = \frac{mP}{m'Q} \text{ pour fixer le point d'application } a \text{ de } r;$$

$$\frac{ab}{m''b} = \frac{m''S}{mP + m'Q} \text{ pour fixer le point d'application } b \text{ de } r';$$

$$\frac{bA}{m'''A} = \frac{m'''T}{mP + m'Q + m''S} \text{ pour fixer celui de R.}$$

36. **Centre des forces parallèles.**— On voit de suite que si, en conser-

vant à toutes les forces leur parallélisme et leurs intensités propres ou plus généralement les mêmes rapports d'intensité, on change leur direction absolue, les quotients que nous venons d'écrire conservent la même valeur, et la résultante générale passe invariablement par le même point. Ce point jouit donc d'une propriété remarquable, que nous utiliserons plus tard dans l'étude du *centre de gravité*. On le nomme le *centre des forces parallèles*.



Fig. 12.

37. **Travail des forces. Unité de travail.** — Un homme qui, par sa force musculaire, élève l'eau du fond d'un puits à sa surface, un cheval qui gravit une côte en traînant une voiture et, en général, tout moteur qui, par un certain effort, déplace son point d'application, effectue du travail mécanique. Comment se fait, dans la pratique, l'évaluation numérique de ce travail? Deux manœuvres sont chargés de porter des pierres d'un rez-de-chaussée à un premier étage; le chemin qu'ils parcourent étant le même, le travail de chacun d'eux doit être évidemment dans le même rapport que le poids de pierre qui a été transporté. Donc, *quand le point d'application d'une force est déplacé de la même quantité, le travail est proportionnel à l'effort exercé.*

Supposons, en second lieu, que l'un des ouvriers portant toujours les pierres au premier étage, l'autre soit obligé de les monter au second, de manière que ce dernier parcoure un espace double dans le sens vertical. Si la quantité de pierres transportées est la même, ne dira-t-on pas que le second ouvrier a fait un travail double de celui du premier? Donc, *quand l'effort exercé a la même grandeur, le travail de la force est proportionnel au chemin parcouru par son point d'application.*

Partant de ces notions empruntées à la pratique la plus vulgaire, et supposant toujours que la force agisse dans la direction du chemin parcouru, appelons t le travail d'une force d'intensité F^{kil}, dont le point d'application s'est déplacé de e mètres. Soient t' et e' les quantités correspondantes pour une autre force d'intensité F'; enfin, supposons que la force F, en déplaçant son point d'application d'une quantité e', fasse un travail T.

Les travaux t et T correspondant à un même effort F, nous aurons, d'après le second énoncé : $\frac{t}{T} = \frac{e}{e'}$. Les travaux T et t' correspondant à un même chemin parcouru, on aura, d'après le premier énoncé : $\frac{T}{t'} = \frac{F}{F'}$. Multipliant ces deux égalités membre à membre, on a $\frac{t}{t'} = \frac{Fe}{F'e'}$.

Si donc on prend pour unité de travail *le travail d'une force d'un kilogramme faisant parcourir à son point d'application un chemin de un mètre*, unité qu'on nomme le *kilogrammètre*, et qu'on représente par le signe Km, on aura : $t = (Fe^{km})$. D'où cette définition du travail mécanique :

38. — On nomme *travail d'une force, dont le point d'application se déplace parallèlement à sa propre direction, le produit de l'intensité de cette force exprimée en kilogrammes par la grandeur du chemin parcouru par le point d'application exprimé en mètres.*

39. **Travail moteur, travail résistant.** — Quand la force est dans le sens même du chemin, on la considère comme positive ; le travail est dit *travail moteur :* c'est celui des ouvriers dont nous parlions tout à l'heure. Si la force agit en sens contraire du chemin parcouru, elle est considérée comme négative : le travail est dit *travail résistant :* c'est celui de la pesanteur agissant sur les pierres qu'on élève à une certaine hauteur.

Une machine quelconque reçoit une certaine quantité de travail moteur et l'emploie : soit à vaincre les résistances actives, celles dont la machine a précisément pour but de triompher, et alors c'est du travail utile qui est accompli ; soit à vaincre les résistances passives, qu'on ne peut jamais complétement éliminer, et qui tiennent aux frottements des divers organes de la machine les uns contre les autres, aux chocs, à la résistance des milieux (air, eau) au sein desquels ces organes sont en mouvement. Cette dernière portion de travail effectuée par la machine représente le *travail perdu.*

40. **Principe de la transmission du travail.** — On démontre, en mécanique, ce principe fondamental que nous ne saurions passer sous silence : *lorsque le mouvement d'une machine est uniforme, le travail moteur est toujours égal au travail résistant total, c'est-à-dire au travail des résistances actives, plus au travail des résistances passives.* Comme ces dernières ne sont jamais nulles, le travail utile est toujours moindre que le travail moteur ; c'est leur rapport, toujours plus petit que l'unité, qu'on nomme le rendement de la machine.

41. **Impossibilité du mouvement perpétuel.** — Ainsi une machine, quelle qu'elle soit, ne crée jamais du travail ; elle transmet et transforme celui qu'on lui fournit, et comme une portion du travail moteur est consommée en pure perte par des résistances passives, qu'on ne peut entièrement supprimer, on est en droit d'affirmer que cette idée du *mouvement perpétuel,* qui a préoccupé tant d'esprits, est une pure utopie. On peut, sans doute, découvrir de nouveaux moteurs, mais on n'inventera jamais une machine dans laquelle, par une certaine combinaison d'organes, il puisse se faire que le travail à exécuter soit réalisé ; et qu'en outre, un travail nouveau soit produit qui entretienne le mouvement de la machine en lui rendant à chaque instant sa vitesse primitive.

LIVRE DEUXIÈME

PESANTEUR

CHAPITRE PREMIER

ACTION GÉNÉRALE DE LA PESANTEUR SUR LES CORPS

42. **Pesanteur.** — Un corps rendu libre dans l'espace tombe à la surface de la terre, en se dirigeant vers son centre. Nous établirons ce fait, un peu plus loin, par une expérience très-concluante. — Posé sur un plan fixe horizontal, il presse d'une manière continue contre l'obstacle qui s'oppose à sa chute, et déforme, d'une manière plus ou moins apparente, le plan contre lequel s'opère cette pression. Un dynamomètre (17) auquel on suspend un corps, montre très-bien, par la flexion des lames d'acier qui le constituent, la déformation dont il s'agit ici. — Tout se passe donc *comme si* les particules matérielles qui composent le globe terrestre exerçaient une attraction simultanée sur les molécules des corps. Un raisonnement bien simple montre, en effet, que, dans cette hypothèse, et en admettant en outre que la terre est formée de couches sphériques homogènes, les corps doivent, en tombant, se diriger vers son centre. Par le point matériel *m* (*fig.* 13), placé au-dessus de la surface de la terre et, par le centre de cette dernière, menons un plan quelconque MN; il partagera le globe en deux hémisphères égaux et formés d'un même nombre de particules attirantes symétriquement placées. Il n'y a aucune raison pour que le point *m*, en tombant, se dirige plutôt à droite qu'à gauche du plan considéré; il devra demeurer invariablement dans ce plan. Répétant le même raisonnement pour un autre plan M'N' passant par *m* et C, on arrivera à la même conclusion; donc le mobile doit se mouvoir constamment dans les

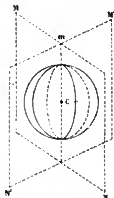


Fig. 13.

deux plans à la fois et suivre le rayon mC qui représente leur intersection commune. La force qui l'attire est, par suite, dirigée suivant le même rayon mC. C'est cette force attractive provenant de l'action des diverses parties du globe terrestre sur les molécules matérielles situées à l'extérieur qu'on nomme la pesanteur.

Pour caractériser une force, avons-nous déjà dit, il faut connaître sa direction, son point d'application, son intensité.

I. — DIRECTION DE LA PESANTEUR.

43. **Fil à plomb.** — La direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles ou, comme on dit, *verticale*. Prouvons-le expérimentalement : on suspend un cône de platine M (*fig.* 14) à un fil de soie très-fin, *parfaitement flexible* et fixé à l'une de ses extrémités. C'est ce petit appareil qu'on nomme un *fil à plomb* (le corps suspendu peut être quelconque). Quand le système est en équilibre, la direction du fil donne exactement la direction de la pesanteur; car, dire que le fil est parfaitement flexible, c'est admettre implicitement que toute force, quelque petite qu'elle soit, ne sera détruite par la résistance du fil qu'autant qu'elle agira suivant sa longueur. Or, ici, la pesanteur P est la seule force qui intervienne; elle est détruite par la résistance du fil, puisqu'il y a équilibre; donc, elle agit suivant son prolongement. D'autre part, si le cône de platine plonge dans le mercure (*fig.* 15) où il se trouve, comme dans l'air, baigné par un fluide à molécules très-mobiles qui n'oppose aucun obstacle à son mouvement, on constate que, dans quelque position qu'on se place autour de cet appareil, en mettant un se-



Fig. 14.

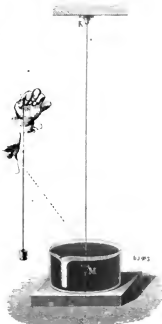


Fig. 15.

cond fil à plomb entre l'œil et le fil KM, celui-ci semble toujours se trouver sur le prolongement rectiligne de sa propre image réfléchie par le bain de mercure. Ce résultat prouve — nous l'établirons dans le Livre de la Lumière — que le fil à plomb est perpendiculaire à la surface libre du mercure. Le même résultat ayant lieu pour les eaux tranquilles dont la surface sphérique se confond avec celle de notre globe, nous sommes autorisés à dire que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface de la terre, et que, par suite, elle passe invariablement par son centre.

Il en résulte que, dans des lieux très-voisins, à cause du grand éloignement du centre de la terre, deux fils à plomb devront être considérés comme parallèles.

44. **Déviation du fil à plomb en quelques points du globe.** — Dans le voisinage des hautes montagnes, le fil à plomb éprouve une déviation sensible. Ce fait a été établi, dès le milieu du siècle dernier, par Bouguer et La Condamine, et vérifié depuis, dans un grand nombre de localités. Un fil à plomb placé à peu de distance du mont Shéhallien, en Écosse, éprouva une déviation d'environ 6″. — Il va sans dire qu'il faut, pour estimer un angle aussi petit, recourir à des mesures astronomiques et géodésiques très-délicates. — Le fait de la déviation se conçoit du reste très-bien en recourant au raisonnement placé au commencement de ce chapitre. Si le plan mené par m et C (*fig.* 13) divise la terre en deux parties telles que l'une d'elles présente à une faible distance de m une masse considérable, une montagne, par exemple, la symétrie de part et d'autre du plan, sur laquelle notre raisonnement était fondé, n'existe plus, et le corps doit se mouvoir du côté vers lequel il est le plus fortement attiré.

45. **Poids d'un corps.** — La pesanteur attirant chaque portion de matière, quelque petite qu'elle soit, il y aura autant de petites forces parallèles agissant simultanément sur un même corps soumis à l'action de la pesanteur qu'il y aura de particules. Nous avons vu (36) que toutes ces forces donnaient, dans ce cas, naissance à une résultante égale à leur somme, parallèle à leur direction et passant par un point invariable qui ne dépend nullement de la direction absolue des forces. *Le poids d'un corps, c'est la résultante des actions de la pesanteur sur ce corps.*

II. — POINT D'APPLICATION DE LA PESANTEUR.

46. **Centre de gravité.** — *Le centre de gravité, c'est le point d'application de cette résultante* (45). Ce point peut se trouver placé en dehors du corps, comme dans le cas d'un anneau ou d'un cylindre creux ; mais alors, si on voulait remplacer les actions de la pesanteur sur les diverses parties du corps par une force unique appliquée à son centre de gravité, il faudrait imaginer ce dernier point rattaché au corps par des liens inflexibles et

sans pesanteur de manière que leur introduction ne fît varier ni la position du centre de gravité du système ni le poids du corps.

47. Définition pratique du centre de gravité. — Si le centre de gravité d'un corps est invariablement fixé, le corps est en équilibre dans toutes les positions, car son poids est constamment détruit par la résistance du point fixe. De là cette autre définition pratique du centre de gravité : *C'est un point qui est tel que, lorsqu'on le fixe, le corps demeure en équilibre dans toutes les positions.*

48. Équilibre d'un corps posé sur un plan horizontal. — Quand un corps M (*fig.* 16) est posé sur un plan horizontal et n'a avec lui qu'un seul point de contact A, il faut, pour l'équilibre, que la verticale du centre de gravité passe par le point A. Lorsqu'il existe plusieurs points d'appui A, B,

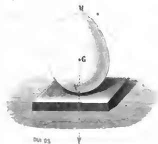


Fig. 16



Fig. 17.

C (*fig.* 17), cette verticale doit tomber dans l'intérieur du polygone convexe qu'on formerait, en joignant par des droites les différents points de contact du corps M et du plan. On appelle ce polygone : *la base de sustentation* du corps.

Dans le premier cas, en effet, le poids du corps appliqué en G est détruit en A par la résistance de l'obstacle, puisque la direction de cette force normale au plan du support passe par les points G et A, invariablement liés entre eux, comme faisant partie d'un même corps solide.

Dans le second cas, les trois réactions exercées de bas en haut par le support, aux trois points de contact A, B, C, ne peuvent donner qu'une résultante passant entre ces points ; or, cette résultante, pour faire équilibre au poids du corps, doit lui être égale et directement contraire ; donc, pour l'équilibre de ce corps M, il est nécessaire que la direction de son poids ou la verticale menée par le centre de gravité G, tombe dans l'intérieur du triangle ABC.

49. Influence exercée par la position du centre de gravité dans un

corps. — La position du centre de gravité a encore une grande influence sur la nature de l'équilibre. Prenons, par exemple, le cas d'un corps pesant mobile autour d'un axe horizontal, et choisissons, à cause de son importance, l'équilibre du fléau de la balance. Ce fléau, constitué par une barre métallique ayant habituellement la forme indiquée par la figure 18, est traversé, en son milieu, par un prisme d'acier, nommé cou-

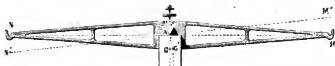


Fig. 18.

teau, qui repose par une arête vive, sur un plan en acier ou en agate; les deux moitiés MA, NA, ou bras du fléau, étant égales en poids, le centre de gravité se trouve nécessairement dans le plan perpendiculaire à l'axe de figure passant par l'arête du couteau. Trois cas peuvent se présenter : le centre de gravité peut être au-dessus de l'axe de suspension, ou au-dessous, ou enfin coïncider avec l'axe lui-même.

50. **Équilibre instable.** — Dans le premier cas, soit A l'axe de suspension, g' le centre de gravité; pour l'équilibre, il faudra, comme toujours, que la verticale du centre de gravité passe par l'axe ou bien que le fléau soit horizontal. Mais si on vient à déranger ce dernier, même d'une petite quantité, de sa position d'équilibre et à l'incliner suivant M'N', le centre de gravité descendra de g' en g sur l'arc de cercle du rayon g'A, et la force appliquée au centre de gravité entraînera de plus en plus le fléau du côté vers lequel on l'a incliné; c'est-à-dire que celui-ci abandonnera définitivement sa position initiale pour ne plus la reprendre : l'équilibre primitif était *instable*.

51. **Équilibre indifférent.** — Si g' se confond avec A, le centre de gravité est fixe : le fléau sera donc en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donnera : l'équilibre est *indifférent*.

52. **Équilibre stable.** — Enfin, si le centre de gravité est en G, audessous de A, quand on inclinera le fléau suivant M'N', le centre de gravité montera de G en G' sur l'arc de cercle du rayon GA, et l'on voit que le centre de gravité, qui tend toujours à descendre le plus bas possible par l'effet de la force qui lui est appliquée, ramènera nécessairement le système dans sa position initiale, en le faisant osciller pendant quelque temps de part et d'autre de cette position. L'équilibre est *stable*.

En général, on peut reconnaître que l'équilibre d'un système pesant mobile autour d'un axe, ou celui d'un corps qui, posé sur un plan, ne le touche que par un élément de surface, comme M (*fig.* 16), est stable toutes

les fois que son centre de gravité monte pour le moindre dérangement imprimé au corps. Il est instable, lorsque, dans les mêmes circonstances, le centre de gravité descend; il est indifférent lorsque le centre de gravité se maintient, dans tous les cas, à la même hauteur.

Dans un système quelconque, soumis à des ébranlements, une voiture, par exemple, traînée sur une route qui n'est ni horizontale ni plane, la stabilité de l'équilibre est d'autant plus parfaite, que le centre de gravité est placé plus bas. C'est qu'en effet la verticale du centre de gravité exige, pour tomber en dehors de la base de sustentation, une inclinaison de la voiture d'autant plus forte que le centre de gravité est plus rapproché du sol.

53. **Détermination du centre de gravité.** — Lorsqu'un corps est homogène, et qu'il présente une figure géométrique; ou lorsque, étant hétérogène, on connaît la loi suivant laquelle varie la densité des diverses parties qui le constituent, on arrive par le calcul à fixer *à priori* la position de son centre de gravité. On peut considérer comme évident, que tout corps homogène qui a un plan de symétrie ou un axe de symétrie, a son centre de gravité sur ce plan ou sur cet axe, que tout corps qui possède un centre de figure a son centre de gravité coïncidant avec le centre de figure.

Donc, le centre de gravité d'une ligne droite supposée pesante sera en son milieu;

Le centre de gravité d'un cercle, en son centre;

Le centre de gravité d'un parallélogramme, au point de croisement de ses diagonales;

Le centre de gravité de l'aire d'un triangle, au point de rencontre des médianes, ou au tiers de l'une d'elles à partir de la base;

Le centre de gravité d'une sphère, en son centre de figure;

Le centre de gravité d'un parallélipipède, au point de concours de ses diagonales.

54. **Détermination expérimentale du centre de gravité d'un corps.** — Lorsque le corps est de forme irrégulière, il faut recourir à une méthode physique pour fixer la position du centre de gravité.

1° Le corps a-t-il un poids peu considérable? On le suspend successivement à un fil par deux points choisis arbitrairement; on le laisse chaque fois se mettre en équilibre, et le point de rencontre des deux directions du fil prolongées dans le corps, donne le centre de gravité cherché.

2° Le corps est-il volumineux et pesant (une pierre de taille présentant des arêtes vives, par exemple)? On le pose sur un support horizontal S (*fig.* 19), en l'adossant à un plan incliné P, mobile autour d'une charnière C. A l'aide d'un cric on déplace peu à peu le plan incliné, de manière à faire tourner la pierre autour d'une de ses arêtes A, qui repose sur le

plan horizontal et qu'on a rendue parallèle à la charnière. Au moment où le corps a atteint une position telle que, pour la plus légère augmentation dans le déplacement, il tomberait du côté opposé au plan incliné, position qu'il est toujours facile d'obtenir par tâtonnement, on est sûr que le centre de gravité est dans le plan vertical qui passe par l'arête. On répète le même essai sur trois arêtes différentes de la pierre de taille, et le point de rencontre des trois plans ainsi obtenus est le centre de gravité.

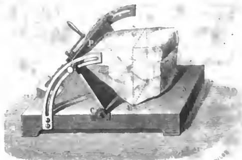


Fig. 19.

III. — INTENSITÉ DE LA PESANTEUR. — CHUTE DES CORPS.

55. — Avant de mesurer l'intensité de la pesanteur, cherchons à concevoir *à priori* à quelle espèce de force nous avons affaire. Dans un même lieu, la pesanteur doit présenter une intensité constante ; car, puisqu'elle a pour cause unique l'attraction des diverses parties de la terre, et que tout se passe, d'après ce qu'on démontre en astronomie, comme si toute la masse du globe était réunie à son centre, il s'ensuit que tant que la distance du corps attiré au centre de la terre ne varie pas sensiblement, la force qui l'attire conserve la même grandeur (*). Les espaces qu'il parcourt en tombant sont d'ailleurs tout à fait négligeables en présence du rayon terrestre. Ainsi nous pouvons affirmer, dès à présent, que la pesanteur est une force constante en grandeur et en direction.

56. **Tous les corps tombent avec la même vitesse dans le vide.** — Le premier fait qui nous frappe dans le mouvement habituel des corps soumis à l'action de la pesanteur, c'est la vitesse différente de leur chute. A égalité de surface, ceux qui ont une moindre masse mettent plus de temps à tomber d'une même hauteur. Ainsi un disque de papier tombe moins vite qu'un disque d'argent de même diamètre ; une boule de liége, moins vite qu'une boule de plomb de même volume. Newton a démontré, le premier, que cette différence dans la vitesse de chute est due à la résistance de l'air. Il suffit, en effet, de faire le vide dans un long tube de verre (*fig.* 20), portant à l'une de ses extrémités un robinet et renfermant des corps de densités très-inégales, des barbes de plume, du papier, du liége, du plomb,

(*) Cette condition est précisément remplie dans toutes nos expériences, car toujours nous étudions la chute d'un corps à la surface de la terre.

du fer, pour montrer qu'en retournant brusquement le tube tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse. Le liége et le plomb, malgré la grande différence qui existe entre leur densité, s'accompagnent dans tout le parcours du tube, comme s'ils avaient été rendus solidaires l'un de l'autre.


Fig. 20.

Quelques mots d'explication sont nécessaires : l'expérience précédente nous montrant que la vitesse de chute d'un corps dans le vide est indépendante de sa masse, nous sommes en droit d'admettre qu'un corps tombe avec la même vitesse que posséderait chacune de ses molécules obéissant isolément à l'action de la pesanteur. Or, si le corps en question, au lieu de cheminer dans le vide, se meut dans un milieu résistant, l'atmosphère, il communique un mouvement à l'air, primitivement en repos, qu'il rencontre sur son passage et éprouve par suite lui-même une certaine perte de vitesse. Cette perte est la même, dès les premiers moments de la chute, pour deux corps présentant des surfaces égales et que nous supposerons de même nature, quoique de masses différentes : deux sphères en plomb, l'une creuse, l'autre massive. Mais comme elle se répartit entre toutes les molécules de chaque mobile, elle est d'autant moindre pour chacune d'elles, que le mobile en contient davantage ou que sa masse est plus grande; c'est dire que la sphère massive de plomb doit tomber plus vite que la sphère creuse. On peut concevoir maintenant, sans que nous ayons la prétention de l'expliquer ici, comment une inégalité du même genre doit se produire entre des mobiles de même forme, qui différeront, à la fois, par leur masse et par leur nature. Du reste, la résistance opposée par un fluide au mouvement d'un corps croît plus rapidement que la vitesse de ce dernier; si bien qu'un mobile qui tomberait dans l'atmosphère d'une hauteur suffisante, prendrait nécessairement un mouvement uniforme, avant d'arriver à la surface du sol.

57. **Lois de la chute des corps**. — Pour déterminer la relation qui lie l'espace parcouru par un corps qui tombe au temps employé à le parcourir, relation qu'on a nommée *loi des espaces*, et celle qui unit la vitesse à la durée de la chute, qu'on a nommée *loi des vitesses*, on a recours à deux appareils qui permettent une assez grande précision dans les mesures : la machine du physicien anglais Atwood, et la machine à indications continues de M. Morin.

58. **Machine d'Atwood. — Principe**. — Un corps de masse m, en tombant librement sous l'action de la pesanteur, acquerrait, au bout d'un certain temps t, une vitesse v. Si, par l'emploi de la même force (le poids de la masse m), la masse mise en mouvement est $2M+m$, la vitesse v', au

bout du même temps, dans ce nouveau cas, sera $v' = \frac{m}{2M + m} v$ (28). Nous avons donc la faculté, en augmentant M par rapport à m, de rendre la vitesse de chute d'un système pesant aussi faible que nous le voudrons, sans que le rapport des vitesses, ou la loi du mouvement, soit pour cela altéré. Dès lors, les espaces parcourus pourront être mesurés sans que la résistance de l'air trouble le phénomène.

59. **Construction de l'appareil.** — Sur une poulie à gorge creuse P (*fig.* 21) s'enroule un fil fin, portant des masses A, B, qui, ayant chacune pour valeur M, se font mutuellement équilibre. L'une des masses A peut se mouvoir verticalement le long d'une règle de bois L divisée en parties d'égale longueur. En un point quelconque de cette règle, peuvent être fixés, par une vis de pression, des curseurs C et C', l'un C formé par un disque de métal : nous le nommerons le *curseur plein ;* l'autre C', par un anneau : nous le nommerons le *curseur annulaire*. Le dernier est assez large pour laisser passer librement la masse A ; mais il arrête la lame métallique D, de masse m, qu'on place au-dessus de A. Un appareil chronométrique battant les secondes fait partie de la machine. Au moment où la première unité de temps commence, il fait partir une détente qui abaisse la tige de métal mobile à charnière qui maintient la masse A à la hauteur du zéro de la graduation. Dans ces conditions, les corps A et B, qui resteraient immobiles, s'ils étaient seuls, sont mis en mouvement par le poids de la masse additionnelle D qui est elle-même entraînée; et la formule $v' = \frac{m}{2M + m} v$ est applicable. Tout le système est porté par un socle muni de quatre vis calantes qui permettent de rendre verticale les règles graduées. — On remarquera que l'axe de la poulie P, au lieu de tourner sur des coussinets fixes, repose sur les circonférences de quatre poulies croisées deux à deux qui sont mises en mouvement par cet axe. De cette façon, on substitue au frottement de *glissement*, le frottement de *roulement* toujours beaucoup plus faible.

60. **Fonctionnement de l'appareil. — Loi des espaces.** — La masse additionnelle étant posée sur A, on abandonne le système à lui-même à l'origine de la première unité de temps. On cherche alors par tâtonnement à placer le curseur plein en un point tel, qu'on entende le choc de A contre ce curseur au moment où le bruit du pendule indique le commencement de la deuxième seconde ; la position du curseur sur la graduation donne l'espace parcouru en une seconde, soit 15 centimètres. On ramène A au zéro ; on recommence l'expérience, et on constate qu'il faut placer le curseur plein à la distance 4×15 ou 60 centimètres, pour que le poids vienne le frapper à l'instant où la troisième seconde commence. De même le curseur C doit être placé à une distance du zéro égale à 9×15, ou 135 centimètres, pour que le poids y arrive au bout de 3 secondes. Il en résulte que les espaces parcourus sont :

Pendant 1 seconde........... $(15^c) = 15 \times 1$
Pendant 2 secondes......... $15^c \times 4 = 15 \times 2^2$
Pendant 3 secondes......... $15^c \times 9 = 15 \times 3^2$

Donc *les espaces parcourus, quand on les compte à partir de l'origine du mouvement, varient proportionnellement aux carrés des temps employés à les parcourir*, ce qui revient à écrire :



Fig. 21. — Machine d'Atwood.

$$(1) \qquad e = vt^2,$$

e étant l'espace parcouru au bout du temps t, et v une constante dont nous déterminerons tout à l'heure la valeur numérique.

61. **Loi des vitesses.** — Pour évaluer la vitesse au bout de 1, de 2, de 3 secondes, définie comme elle l'a été (21), nous placerons le curseur annulaire à la division 15 (*), et nous recommencerons l'expérience précédente en arrêtant la masse A par le curseur plein, à la fin de la deuxième seconde. Nous trouvons que ce dernier curseur doit être placé à la division 45. Cette expérience donne la vitesse après une seconde de chute. En effet, pendant la première unité de temps le poids s'est mû d'un mouvement varié et a parcouru 15 centimètres ; à la fin de cette première seconde, la masse additionnelle, qui faisait varier le mouvement, étant arrêtée par C', le système n'a plus été animé que d'un mouvement uniforme dû à la vitesse acquise. Cette vitesse sera donc mesurée par l'espace 30 centimètres, compris entre la division 15 et la division 45. De même plaçons le curseur C' à la division 60 : nous trouverons que le curseur plein doit être placé à la division 120, pour arrêter le poids à la fin de la troisième seconde. Donc la vitesse, après 2 secondes, est $120^c - 60^c = 60^c$.

P Poulie principale. — A et B Masses égales. — L et L' Règles graduées. — C Curseur plein. — C' Curseur annulaire.

(*) En réalité, c'est un peu au-dessus de la division 15 que le curseur C' doit être placé, afin qu'il arrête la masse additionnelle, au moment où la base inférieure de A passe devant la division 15.

En résumé, les vitesses d'un corps qui tombe sont successivement :

Après 1 seconde...... $30^c = 30 \times 1$
Après 2 secondes....... $60^c = 30 \times 2$
Après 3 secondes....... $90^c = 30 \times 3$

Les vitesses acquises sont proportionnelles aux temps employés à les acquérir. Or, comme cet énoncé donne la définition même du mouvement uniformément varié (22), et que d'autre part le mouvement suit les mêmes lois, quel que soit le poids absolu de la masse additionnelle, ou la valeur de la force qui produit le mouvement, pourvu qu'elle demeure la même pendant la durée de l'expérience, nous en concluons que *toute force constante produit un mouvement uniformément varié.* C'est la vérification expérimentale de la conséquence à laquelle nous avait conduits le second principe fondamental de la mécanique (25).

Remarquons que la vitesse de 30 centimètres au bout de la première seconde est juste le double de l'espace 15 centimètres parcouru d'un mouvement uniformément varié pendant cette seconde. Le fait est vrai quelles que soient les valeurs de M et m. Si donc, dans la formule (1), nous faisons $t = 1$, comme on a $e = c$, il s'ensuit que la constante c, qui est l'espace parcouru dans la première seconde de chute, n'est autre chose que la moitié de l'accélération $\frac{1}{2} g$. On peut donc écrire ainsi la formule (1) : $e = \frac{1}{2} gt^2$.

Les lois de la chute des corps sont alors représentées par les deux formules :

$$e = \frac{1}{2} gt^2, \quad (1)$$
$$v = gt. \quad (2)$$

Si l'on élimine t entre ces deux égalités, on trouve :

$$v = \sqrt{2ge}. \quad (3)$$

Donc *les vitesses qu'un corps acquiert en tombant sont proportionnelles aux racines carrées de ses hauteurs de chute.*

N'oublions pas que, dans tout ce qui précède, on suppose que le corps qui tombe ne possède aucune vitesse initiale.

62. **Proportionnalité des forces aux vitesses.** — Supposons que, dans la machine d'Atwood qui va nous servir, les masses égales A et B soient chacune formées de sept rondelles, d'égal diamètre et d'égal poids, qu'on puisse enlever à volonté : la masse de l'une des rondelles est prise comme unité de masse, et elle est égale, en outre, à la masse additionnelle employée. Faisons une première expérience, comme il a été dit pour la vérification de la loi des espaces, et déterminons l'espace parcouru dans la première seconde de chute.

Voici les résultats numériques :

Masse totale en mouvement, se composant de A, de B et de la masse additionnelle. . . . . . . $7 + 7 + 1 = 15$

Force qui produit le mouvement, ou poids de la masse additionnelle. 1

Espace parcouru par le système, pendant la première seconde de chute. . . . . 32^c,5

Donc, vitesse après une seconde ou accélération. . . . . $2 \times 32{,}5 = 65$

Dans une seconde expérience on enlève une rondelle à la masse B pour la déposer sur A ; et on replace sur cette dernière la même masse additionnelle que précédemment. Voici les résultats obtenus dans ces nouvelles conditions :

Masse totale en mouvement se composant de B, de A et de la masse additionnelle. . . . . . . $6 + 8 + 1 = 15$

Force qui produit le mouvement, ou poids de la masse additionnelle et des deux rondelles qui sont en plus sur A. . . . . $1 + 2 = 3$

Espace parcouru par le système, pendant la première seconde de chute. . . . . $97^c{,}5 = 32^c{,}5 \times 3$

Donc, vitesse après une seconde ou accélération. . . . . $2 \times 97{,}5 = 65 \times 3$

Ainsi, quand la masse est constante (toujours égale à 15), le rapport des vitesses au bout du même temps, ou le rapport des accélérations $\left(\frac{65}{65 \times 3}\right)$ est égal au rapport des forces constantes qui ont successivement produit le mouvement $\left(\frac{1}{3}\right)$.

63. **Mouvement uniformément retardé.** — Plaçons une seconde règle verticale graduée, à côté du fil qui porte le poids B (*fig.* 22), et en regard de la partie supérieure de chaque poids fixons des curseurs annulaires munis chacun d'une masse additionnelle égale. Le poids A correspond à la 50e division, et le poids B à la 70e. Relevons le premier jusqu'au zéro avec la masse additionnelle qu'il emporte, et abandonnons-le à lui-même. Il arrive au curseur C′ avec une certaine vitesse dépendante de la hauteur de chute 50^c, et y dépose la masse additionnelle. En même temps, le poids B arrive en C″; il possède, de bas en haut, la même vitesse que A et se charge de la même masse additionnelle. Or, l'expérience montre que le poids B, dans ces conditions, remonte à très-peu près à la 20e division: il y arriverait exactement, s'il n'y avait

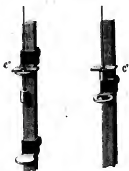


Fig. 22.

les frottements et la résistance de l'air : il a parcouru de bas en haut depuis C″, avec sa vitesse acquise, une hauteur de $70^c - 20^c = 50^c$. Donc, ***quand un corps est lancé de bas en haut avec une certaine vitesse initiale, il monte à une hauteur telle qu'en revenant ensuite librement à son point de départ, il y reprend exactement une vitesse égale et de signe contraire à celle qu'il avait en partant.*** On peut généraliser cette loi du mouvement retardé, en disant qu'en chaque point m de sa trajectoire (*fig.* 23) le corps retrouve, en tombant, une vitesse égale à celle qu'il possédait, au même point, pendant son ascension. En effet, quand le mobile, en montant, arrive en m, on peut considérer sa vitesse actuelle, quelle qu'en soit l'origine, comme une vitesse initiale, et, à partir de m, il se trouve, comme à l'ordinaire, soumis à l'action de la pesanteur. Dès lors il parvient comme précédemment au point K, et, d'après l'énoncé précédent, il doit posséder, en revenant à son point de départ m, la même vitesse qu'il y avait en partant.



Fig. 23.

64. **Formules du mouvement uniformément varié.** — En vertu du second principe (25), l'effet d'une force sur un corps étant indépendant du mouvement antérieurement acquis par ce corps, nous pouvons écrire que la vitesse d'un mobile animé d'une vitesse initiale v_0, suivant la verticale et soumis en même temps à l'action de la pesanteur, est égale, au bout du temps t, à

$$v = v_0 + gt$$

mouvement uniformément accéléré, si la vitesse est de même sens que la pesanteur, et à

$$v = v_0 - gt$$

mouvement uniformément retardé, si elle est de sens contraire. En général,

$$v = v_0 \pm gt.$$

De même, on aura pour la valeur de l'espace parcouru dans l'un et dans l'autre cas :

$$e = v_0 t \pm \frac{g}{2} t^2.$$

65. **Machine de M. Morin.** — Un poids cylindro-conique en fer P (*fig.* 24), tombant en chute libre, est muni d'un crayon C, qui laisse une trace continue de son passage sur la surface du cylindre de bois M revêtu de papier et tournant autour d'un axe vertical. La rotation du cylindre est produite par la chute d'un poids P′, suspendu à un cordon, lequel, en se déroulant, fait tourner la roue dentée R, engrenant à la fois, par des vis sans fin, et avec l'axe du cylindre M, et avec l'axe A muni de quatre ailettes. Celles-ci, en frappant l'air avec une vitesse croissante, éprouvent de la part de ce fluide une résistance qui augmente plus rapidement que cette vitesse : elles

finissent donc par régulariser le mouvement du cylindre et par le rendre uniforme. Un levier coudé L maintient le poids cylindro-conique à la partie supérieure de l'appareil, et c'est lorsque le poids P' a déjà parcouru les deux

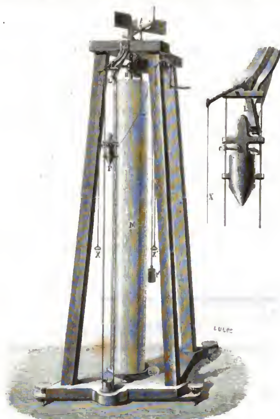


Fig. 24. — Machine de M. Morin.

M Cylindre de bois revêtu de papier. — R Roue dentée recevant le mouvement du poids P'. — A Ailettes régularisant le mouvement. — P Poids cylindro-conique tombant en chute libre. — C Crayon fixe au poids. — L Levier coudé retenant le poids à la partie supérieure. — X et X' Poignées des cordons à l'aide desquels on rend libres les poids P' et P.

tiers de sa course, suivant la verticale, qu'on peut considérer le mouvement du cylindre comme uniforme. A l'aide du cordon X on abaisse alors la longue branche du levier coudé, et le poids P tombe librement.

On déroule la feuille de papier qui recouvrait le cylindre, on l'étend sur un plan, et c'est l'étude de la courbe tracée par le crayon qui va nous permettre de vérifier immédiatement la loi des espaces,

Convenons de prendre, pour unité de temps, le temps nécessaire pour que, dans la rotation du cylindre, l'arête aY' (*fig.* 25) vienne prendre la place de AY, les longueurs Aa, ab, bc, cd étant égales; am sera l'espace parcouru, pendant la première unité du temps, par le poids cylindro-conique; bn, l'espace parcouru pendant 2 unités de temps; co, pendant 3; dp, pendant 4, etc. Or, en mesurant au compas ces diverses longueurs, on trouve

$$bn = 4am;$$
$$co = 9am;$$
$$dp = 16am.$$

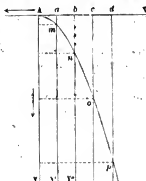


Fig. 25.

La loi des espaces se trouve donc vérifiée.

La courbe que nous venons d'obtenir avec la machine de M. Morin porte, en géométrie, le nom de *parabole*.

La loi des espaces étant ainsi vérifiée, il n'est pas besoin de nouvelles expériences pour démontrer la loi des vitesses; celle-ci s'en déduit par le raisonnement. En effet, la loi des espaces, quand il n'y a pas de vitesse initiale, est exprimée par l'égalité $e = ct^2$ (60), c étant une constante dont l'expérience devra donner la valeur. Si l'espace s'accroît de e_1, le temps augmente d'une quantité correspondante t_1, et on a, par la même raison, $e + e_1 = c(t + t_1)^2 = ct^2 + 2ctt_1 + ct_1^2$. Retranchant de cette dernière égalité la précédente, on a : $e_1 = t_1(2ct + ct_1)$, ou bien $\frac{e_1}{t_1} = 2ct + ct_1$. Passant à la limite en faisant $t_1 = 0$, on aura : limite de $\frac{e_1}{t_1}$ ou $v = 2ct$. Donc les vitesses sont proportionnelles aux temps, et la constante $2c$, dans la formule de la vitesse, est le double de la constante qui entre dans la formule de l'espace. Si donc on écrit $v = gt$, on aura comme précédemment $e = \frac{1}{2}gt^2$.

66. **Intensité de la pesanteur.** — Théoriquement, on pourrait déduire, des indications de la machine d'Atwood, l'accélération que la pesanteur communique à tous les corps tombant librement, laquelle sert de mesure à son intensité. On emploierait la formule

$$g' = \frac{m}{2M + m} g,$$

dans laquelle g' ou l'accélération dans la machine d'Atwood pourrait être évaluée directement en doublant l'espace parcouru dans la première seconde de chute; $\frac{m}{2M + m}$ est égal à $\frac{p}{2P + p}$, p et P étant les poids de la

masse additionnelle et des masses égales suspendues aux deux bouts du fil. On tirerait alors de l'expérience précédente la valeur de g ou l'accélération en chute libre. Mais ce moyen de mesure nécessite plusieurs corrections délicates : il y a les frottements, il y a une influence exercée par la masse de la poulie, qui se trouve elle-même mise en mouvement par la force agissant sur la masse additionnelle, et qui contribue par suite à diminuer la vitesse de chute. — La machine de M. Morin n'est pas davantage susceptible de donner g avec précision.

67. **Pendule simple.** — Pour obtenir la vraie valeur de l'accélération de la pesanteur en un lieu donné, on doit recourir au pendule. Le pendule idéal, qu'on nomme *pendule simple*, consiste en un point matériel pesant m (*fig.* 26), suspendu à l'extrémité d'un fil inextensible, sans pesanteur, n'exerçant aucun frottement contre son point d'appui. Tout le système est supposé, en outre, se mouvoir dans le vide. Si l'on écarte le point matériel de sa position d'équilibre et qu'on l'amène en m', la pesanteur qui tend à l'entraîner suivant la verticale $m'V$ ne peut produire son effet ; car, à cause de la résistance du fil, le point matériel est assujetti à se mouvoir sur une circonférence de rayon Cm. Mais nous savons (32) que la force $m'V$ peut se décomposer en deux autres suivant des directions



Fig. 26.

données : la tangente au cercle et le prolongement du rayon. Achevons le rectangle $VIm'K$, $m'I$ sera la composante de la pesanteur ayant pour résultat de tendre le fil, $m'K$ sera la composante effective qui produit le mouvement sur l'élément du cercle que le point m' va parcourir. Cette dernière a pour expression dans le triangle $Vm'K$: $m'K = m'V \sin\alpha$, α étant l'angle que fait actuellement la direction du pendule avec la verticale. On voit que la force proportionnelle à $\sin\alpha$, qui produit réellement le mouvement du pendule, est variable, à chaque instant, en grandeur et en direction. Elle est maximum en m', et nulle en m, puisqu'en ce point $\sin\alpha = 0$. Cependant, quoique la force qui produit le mouvement aille en décroissant, la vitesse du pendule augmente depuis m', où elle est zéro, jusqu'en m, où elle est maximum. En vertu de cette vitesse acquise, le pendule remontera sur l'arc mm'' : la vitesse ira maintenant en diminuant sous l'action de la pesanteur, qui joue, cette fois, le rôle d'une force retardatrice, et, pour qu'elle devienne nulle, il faudra que le pendule parcoure un arc mm'' égal à mm'. En chaque point de ce nouvel arc la pesanteur, agissant en sens contraire, détruira l'effet qu'elle a produit pendant la descente du mobile. Arrivé en m'', celui-ci se trouve dans

les mêmes conditions qu'en m'; il reviendra donc de m'' en m', sa vitesse repassant exactement par les mêmes valeurs, aux différents points de la trajectoire. Nous avons là un mouvement varié dans lequel l'accélération n'est pas constante; on le nomme *mouvement périodique* ou *mouvement oscillatoire*. Après des intervalles de temps égaux, la vitesse repasse par les mêmes valeurs. — L'angle α est l'amplitude de l'oscillation.

68. **Lois des oscillations pendulaires.** — Le calcul s'applique très-bien au cas simple que nous venons d'examiner, et la relation entre la durée de l'oscillation t, la longueur du pendule simple l, et l'accélération de la pesanteur g est donnée par la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \tag{1}$$

π représente, comme à l'ordinaire, le rapport de la circonférence au diamètre.

Cette formule nous conduit aux lois suivantes; puisque la valeur de t est indépendante de α et que le calcul de la formule suppose α très-petit :

1re Loi. — *Pour de petites amplitudes, et dans le même lieu, la durée des oscillations d'un pendule est constante malgré les variations de l'amplitude.* C'est la loi de l'*isochronisme* des petites oscillations pendulaires.

2e Loi. — *Dans le même lieu, et pour des pendules de longueurs différentes, les durées d'une oscillation varient proportionnellement aux racines carrées des longueurs de ces pendules,* car g étant constant, on a : $\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l'}}$.

3e Loi. — *Dans des lieux différents, les durées des oscillations des pendules de même longueur sont en raison inverse des racines carrées des accélérations de la pesanteur, c'est-à-dire :* $\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{g}}$.

69. Enfin, le pendule nous conduit à la vérification de cette loi déjà établie par l'expérience (56), à savoir : que la pesanteur agit avec la même intensité sur tous les corps. Car, la formule (1) qui s'applique, nous le verrons dans un instant, au pendule composé, exprime entre g, l et t, une relation qui est tout à fait indépendante de la nature de la substance qui forme le pendule.

70. **Pendule composé. — Centre d'oscillation.** — Les trois lois, contenues dans la formule (1), et concernant le pendule simple, s'appliquent tout aussi bien à un pendule ordinaire ou *pendule composé*, à la condition qu'on introduira pour valeur de l, dans la formule, la longueur du pendule simple qui exécuterait son oscillation dans le même temps que le pendule composé qu'on emploie. Un pendule composé peut avoir une forme quelconque; et souvent on adopte la disposition représentée dans la figure 27.

Mais le calcul montre que lorsque le pendule est formé d'une sphère d'une grande masse et d'un petit rayon, une sphère en platine, par exemple, suspendue à l'extrémité d'un long fil d'une masse négligeable, en présence de celle de la sphère, le point matériel placé au centre de la sphère n'est sensiblement ni accéléré, ni retardé, dans son mouvement, par sa liaison avec les points voisins; il oscille comme s'il était seul. On le nomme *centre d'oscillation*, et c'est la distance, facilement mesurable, de ce point à l'axe de suspension du pendule qu'on nomme longueur du pendule composé.

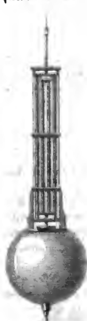


Fig. 27.

71. **Vérification expérimentale des lois.** — Dès lors, les deux premières lois énoncées plus haut, pour le pendule simple, sont facilement vérifiables par l'expérience, sur un pendule composé constitué comme il vient d'être dit. On constate 1° que, même dans l'air, les petites oscillations d'un pendule composé sont isochrones, c'est-à-dire qu'il met, à différentes époques de son mouvement, le même temps pour exécuter le même nombre d'oscillations. Il suffit, pour effectuer cette expérience, d'évaluer, à l'aide d'un chronomètre, la durée de 50, de 100, de 150 oscillations; on trouve que ces durées varient comme les nombres 1, 2, 3; 2° en prenant des pendules de longueurs variant comme les nombres 1, 4, 9, 16, on trouve que les durées des oscillations varient comme les nombres 1, 2, 3, 4, c'est-à-dire comme les racines carrées des longueurs de ces pendules.

72. **Mesure de l'accélération de la pesanteur.** — La formule (1) nous permet de déterminer la valeur de g en un lieu donné, car on en déduit :

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2}. \tag{2}$$

Il suffira donc de mesurer exactement, dans le lieu choisi, la durée de l'oscillation d'un pendule dont la longueur aura été déterminée avec soin ; les valeurs de t et de l substituées dans la formule donneront la valeur de g. l doit être exprimée en mètres et t en secondes. On a trouvé ainsi, pour Paris, $g = 9^m,8088$.

73. **Valeur de *g* aux diverses latitudes.** — En opérant de la même façon à diverses latitudes, on trouve que l'accélération de la pesanteur qui peut servir de mesure à son intensité, va en croissant de l'équateur au pôle. Cet accroissement a pour cause principale l'aplatissement de la terre vers les pôles, qui a été constaté et évalué numériquement, au commencement de ce siècle, par la mesure, en divers points du globe de l'arc du méridien

correspondant à un degré. Le pendule se trouvant plus près du centre de la terre, aux latitudes voisines des pôles, doit accuser un accroissement dans l'intensité de la pesanteur.

74. Variation d'intensité de la pesanteur quand on pénètre dans l'intérieur de la terre. — La pesanteur n'est qu'un cas particulier de la gravitation universelle.—Toutes les observations astronomiques s'accordent pour le démontrer. — Son intensité varie donc en raison inverse du carré de la distance au centre du globe, quand on s'élève à de grandes hauteurs au-dessus de la surface terrestre. Mais lorsqu'on pénétrera dans l'intérieur de la terre, g augmentera-t-il ou diminuera-t-il? D'un côté, le calcul nous indique que, dans une sphère homogène, la pesanteur doit diminuer avec la profondeur, et varier proportionnellement à la distance au centre. D'autre part, une expérience faite par M. Airy, avec le pendule, au fond de la mine de Harton, à 385 mètres de profondeur, a montré que la pesanteur augmente d'abord quand on s'enfonce dans la terre, et à 385 mètres, l'accroissement est de $\frac{1}{19190}$ de la pesanteur à la surface. Cette contradiction entre l'expérience et le calcul n'est qu'apparente : les expériences de Cavendish et de Baily nous ont appris que la densité moyenne du globe est de 5,5 environ, tandis que celle des couches superficielles n'est que de 2,5. Il faut nécessairement en conclure que la densité des couches profondes l'emporte de beaucoup sur celle des corps voisins de la surface. On comprend alors, qu'en descendant dans l'intérieur du globe, la diminution de la pesanteur tenant à l'abandon des couches enveloppantes superficielles puisse être plus que compensée par l'accroissement d'attraction dû au rapprochement des couches beaucoup plus denses voisines du centre : si le dernier effet l'emporte sur le premier, g aura augmenté. M. Roche, en admettant que la diminution de densité des couches, quand on se rapproche de la surface, est proportionnelle au carré de la distance au centre, a trouvé un accord remarquable, qui peut n'être que fortuit, entre le calcul et l'observation. Sa formule donne, à 385 mètres de profondeur, $\frac{1}{19530}$, pour valeur de l'accroissement de g, nombre peu différent, on le voit, de celui qu'avait obtenu M. Airy. Il arrive, en outre, à cette conséquence curieuse, que la pesanteur croît jusqu'à une profondeur égale au sixième du rayon terrestre, où elle surpasse de plus de $\frac{1}{15}$, la pesanteur à la surface. A partir de là, elle diminue; au tiers du rayon elle possède la même valeur qu'à la surface, puis elle continue à décroître rapidement jusqu'au centre, où elle est nulle.

75. Longueur du pendule qui bat la seconde. — La formule (1) nous permet encore d'estimer la longueur que doit avoir un pendule pour battre la seconde, en un point donné de la surface de la terre. En faisant $t = 1$ et

substituant la valeur de g qui convient au lieu choisi, on déduit $l = \frac{g}{\pi^2}$.

Pour Paris $l = 0^m,994$.

76. **Application du pendule pour la mesure du temps.** — L'isochronisme des petites oscillations pendulaires a été utilisé par Huyghens pour la mesure du temps. C'est le pendule, nommé dans ce cas balancier, qui est le régulateur ordinaire dans les horloges et dans les pendules de cheminée.

77. **Expérience de M. Foucault.** — L'invariabilité du plan d'oscillation du pendule, qui n'est assujetti qu'à cette unique condition de passer constamment par le centre de la terre, a été mise à profit par M. Foucault pour démontrer la rotation du globe autour de son axe. Supposons un pendule placé au pôle ; son fil de suspension sera dirigé suivant l'axe du monde, et par suite son plan d'oscillation ne sera nullement influencé par la rotation de la terre. Au contraire, un observateur placé dans le voisinage du pendule tourne, sans s'en douter, de l'ouest à l'est, comme la terre dont il fait partie. Le plan d'oscillation du pendule paraîtra donc se mouvoir par rapport à lui, il se déplacera en apparence vers la gauche de l'observateur et fera un tour complet en vingt-quatre heures. Transportons le pendule à l'équateur et faisons-le osciller dans un plan méridien, de manière que la trace de son plan d'oscillation sur l'horizon soit la tangente même au méridien du lieu. Pendant la rotation de la terre, cette tangente demeure parallèle à elle-même et décrit, par suite, un cylindre dont les arêtes sont parallèles à l'axe terrestre. D'autre part, le plan d'oscillation du pendule, tendant à demeurer invariablement parallèle à lui-même, tout en restant vertical, se maintiendra dans le même plan méridien ; sa trace décrira, elle aussi, un cylindre et continuera à se confondre avec la tangente. Donc, il n'y aura pas de déplacement apparent du pendule par rapport à l'observateur. A une latitude intermédiaire, l'expérience montre clairement qu'il y a mouvement apparent de rotation du plan pendulaire autour de la verticale, seulement, ce mouvement est d'autant moins rapide qu'on s'établit plus près de l'équateur. Avec le pendule de 50 mètres de longueur environ que M. Foucault avait installé au Panthéon, le déplacement estimé sur un cercle horizontal tracé aux limites de l'excursion pendulaire, était de plus de 2 millimètres, après une oscillation qui durait 8 secondes.

IV. — POIDS DES CORPS. — BALANCE.

78. Nous avons défini (45) le poids d'un corps. Il nous reste à donner le moyen d'en obtenir une évaluation numérique ; mais, avant tout, l'unité doit être fixée. On a adopté, comme terme de comparaison, le poids du centimètre cube d'eau distillée prise à la température de son maximum

de densité. 4° : on l'a nommé le *gramme*. On fabrique, en fer, en cuivre ou en platine, de petites masses de formes diverses, représentant par leur poids le gramme, les multiples et les sous-multiples du gramme. Ces poids gradués, lorsqu'ils sont destinés à effectuer des pesées précises, sont en général échantillonnés pour le vide, c'est-à-dire que le numéro qui y est inscrit indique le poids qu'aurait la petite masse, si elle était placée dans le vide absolu.

79. Balance. — La balance est un instrument destiné à comparer le poids d'un corps quelconque à celui des poids gradués. Sa construction repose sur un principe théorique qui a été donné § 33 ; nous avons vu que si aux deux extrémités d'une barre inflexible *mm'* (*fig.* 28), nommée *fléau*, que nous supposons réduite à une ligne droite, sont appliqués deux poids égaux et que le milieu de la barre s'appuie sur un support fixe A, ce fléau sera en équilibre. En effet, la résultante des deux forces est appliquée au point A, le poids du fléau agit au même point : donc ces deux forces sont détruites par la résistance du support et n'ont d'autre effet que d'exercer sur lui une pression égale à leur somme. — Cet équilibre a lieu, que le fléau soit horizontal ou incliné. — D'ailleurs, pour la moindre différence dans la grandeur des deux poids, *mm'* s'incline du côté où l'excès de charge est placé, jusqu'à ce qu'il rencontre un obstacle fixe.



Fig. 28.

Avec un pareil système, il serait bien difficile d'arriver à établir l'égalité des tractions s'exerçant en *m* et *m'*, en un mot de faire une pesée. Rien n'indiquerait que l'équilibre est près d'être atteint. Dans la balance, au contraire, l'égalité des poids est accusée par l'horizontalité du fléau, et, s'il y a une petite différence, celui-ci s'incline du côté du poids le plus lourd, mais sans chavirer pour cela. Il prend pour de petites différences de charge une inclinaison fixe d'autant plus grande que cette différence est plus considérable.

80. Théorie de la balance — Pour réaliser cette condition nouvelle, il suffit de remplacer la droite idéale *mm'* par un fléau pesant dont le centre de gravité ne coïncide pas avec l'axe de suspension, mais se trouve en G, au-dessous du point d'appui ; nous avons vu (52) que cette dernière position convient seule à l'équilibre stable du système (*fig.* 29). Supposons, en effet, que les points d'application *m* et *m'* des deux forces ou les points d'attache des bassins de la balance soient sur une ligne droite qui contienne le point d'appui A (*fig.* 30), de manière que, dans toutes les positions du fléau, la résultante 2P des poids égaux soit constamment détruite. Désignons par G le centre de gravité du fléau. Si l'on

met un excédant de charge dans le bassin de droite le fléau s'incline, prend une direction $m_1\ m'_1$; en même temps son centre de gravité se relève, vient



Fig. 29.

en G', et le poids du fléau qui se trouve appliqué en ce dernier point, tend à ramener la barre mobile dans la position horizontale. On conçoit donc qu'il doive se produire un équilibre nouveau du fléau, sous les actions inverses de la charge additionnelle p appliquée en m'_1 et du poids du fléau p_1, appliqué en G'. Il suffira pour cela (48) que la résultante

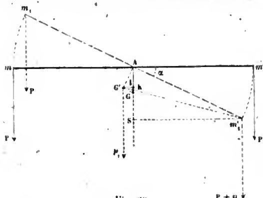


Fig. 30.

des forces p et p_1, appliquées aux extrémités de la droite $G'm'_1$, passe en un point K, tel que son prolongement rencontre le point d'appui. Admettons que cet équilibre existe; et soit α l'angle d'inclinaison du fléau : on aura $\frac{p}{p_1} = \frac{G'K}{Km'_1}$. Menons par G' et m'_1 les lignes horizontales G'I, Sm'_1; la similitude des triangles G'IK, m'_1KS donne $\frac{G'K}{Km'} = \frac{G'I}{Sm'_1}$. Or, dans le triangle rectangle G'AI on a $G'I = G'A \sin \alpha$; dans le triangle rectangle m'_1SA on a $Sm'_1 = Am'_1 \cos \alpha$, substituant $\frac{p}{p_1} = \frac{G'A \sin \alpha}{Am'_1 \cos \alpha} = \frac{G'A}{Am'_1} tg\alpha$; et si nous appelons d la distance G'A du centre de gravité à l'axe de suspension, l la demi-longueur Am'_1 du fléau, on aura $tg\alpha = \frac{pl}{p_1 d}$ (a). Cette formule nous donne la relation qui doit exister entre α, p, l, p_1 et d pour qu'un nouvel équilibre s'établisse, quand l'excédant de charge est appliqué en m'.

81. Condition pour que la sensibilité soit indépendante de la charge. — L'angle α qui représente l'inclinaison du fléau pour l'excès de charge p nous donne la *mesure de la sensibilité de la balance*. On dit, en effet.

qu'une balance est sensible au milligramme, au demi-milligramme, etc., lorsque des poids égaux étant placés dans les deux bassins et l'horizontalité du fléau existant, celui-ci s'incline d'une quantité appréciable, pour l'addition, dans l'un des plateaux, d'un milligramme ou d'un demi-milligramme. L'angle α, on le voit, est indépendant, dans les conditions où nous nous sommes placés, de la charge totale 2P. Il n'en serait point ainsi, nous allons le montrer, si les trois points m, A, m' n'étaient pas en ligne droite.

Supposons d'abord (*fig.* 31) le point d'appui situé au-dessous de la ligne mm', mAm' représentera toujours le fléau Quand l'égalité de charge existera, la ligne mm' sera horizontale et la résultante 2P appliquée au milieu O de mm' sera détruite par la résistance du point d'appui. Mettons un petit excédant de charge p dans le bassin de droite, le fléau s'incline et tend à prendre une position d'équilibre stable. Or, la résultante 2P toujours appliquée au milieu O' de la droite $m_1m'_1$, aura pour effet d'augmenter l'inclinaison du fléau, c'est-à-dire la sensibilité de la balance. Cette fois donc, la sensibilité croîtra avec la charge.



Fig. 31.

On voit de suite, à l'inspection de la figure 32, que si A est au-dessus de mm' la résultante 2P appliquée en O' tend à diminuer l'inclinaison; la sensibilité décroît donc à mesure que la charge totale augmente. — Nous supposerons désormais, dans ce qui va suivre, que les trois points m, A, m', sont en ligne droite.

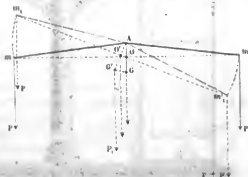


Fig. 32.

82. Conditions de sensibilité. — Elles sont toutes contenues dans la formule (a) $tg\alpha = \frac{pl}{p_1 d}$: on y voit que $tg\alpha$, et par suite l'angle α lui-même

qui, lorsqu'il est très-petit, peut être considéré comme se confondant avec sa tangente, varie proportionnellement à la longueur du bras du fléau l, en raison inverse du poids du fléau p_1, et en raison inverse de la distance d du centre de gravité à l'axe de suspension. Donc, pour qu'une balance soit sensible, il faut : 1° un fléau long ; 2° un fléau léger. Ces deux conditions paraissent au premier abord incompatibles, quand on songe que le fléau doit offrir en même temps une grande rigidité, afin que les points m et m' ne descendent pas au-dessous de l'horizontale passant par A, au moment de l'équilibre. On les réalise toutes les deux, le mieux possible, en donnant au fléau la forme indiquée ci-contre, celle d'une losange évidée de part et d'autre de l'axe. Les bras offrent ainsi une grande résistance à la flexion, quoiqu'ils ne possèdent qu'une masse assez faible.

3° Le centre de gravité doit être au-dessous, mais voisin de l'axe de suspension. A cet effet, l'opérateur règle lui-même la sensibilité de la balance et l'augmente ou la diminue à volonté. Il est des cas, en effet, où

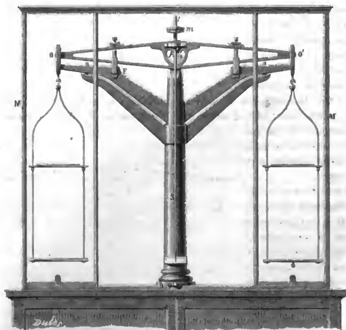


Fig. 33.

une trop grande sensibilité est nuisible, en rendant les pesées très-longues. Une petite masse m (*fig.* 33) servant d'écrou peut se déplacer sur la tige t.

qui porte un pas de vis; l'ascension de l'écrou rapproche G de A et augmente la sensibilité.

4° Le fléau doit être parfaitement mobile. C'est l'arête vive d'un prisme d'acier A fixé perpendiculairement au fléau et posé sur un plan d'agate horizontal qui représente l'axe de suspension. Pour éviter que l'arête de ce prisme et celles des couteaux extrêmes qui portent les bassins ne s'émoussent par une pression trop prolongée, un système de fourchettes F, mû par un bouton B placé en dehors de la cage de la balance, supporte le fléau et les bassins pendant que la balance ne sert pas.

83. Conditions d'exactitude d'une balance. — De la théorie que nous venons de donner, découlent naturellement les principes qui doivent guider pour la bonne construction de la balance. Pour que cet instrument soit exact, il faut : 1° que les deux bras du fléau soient égaux en poids; 2° qu'ils soient égaux en longueur; qu'en un mot, de part et d'autre du plan vertical passant par l'axe de suspension la balance présente une symétrie complète. On constate que la première condition est remplie en enlevant poids et bassins et examinant si le fléau se place de lui-même horizontalement. Cette horizontalité se reconnait d'ailleurs aisément à l'aide d'une longue aiguille S fixée perpendiculairement à l'axe du fléau, en son milieu, et se mouvant sur un petit arc gradué en ivoire (*fig.* 33); on règle d'avance l'appareil de manière que lorsque l'aiguille est verticale, elle coïncide avec le zéro de la graduation. La seconde condition est réalisée toutes les fois qu'après avoir suspendu les bassins en O et O', reconnu que, sous leur influence, le fléau est encore horizontal, et placé dans chacun d'eux des corps se faisant mutuellement équilibre, on trouve, qu'en changeant les corps de bassin, l'horizontalité du fléau se maintient encore. Il est certain que si les bras avaient été inégaux, pour produire l'équilibre dans la première pesée, le corps le moins lourd eût été placé à l'extrémité du bras de levier le plus long, et, dans la seconde il se serait trouvé transporté à l'extrémité du bras le plus court : le fléau n'eût donc pu cette fois demeurer horizontal. 3° Les points d'attache des bassins au fléau doivent demeurer invariables et la verticale du centre de gravité de chaque bassin et des corps qui y sont placés doit toujours passer par ces points de suspension. A cet effet, le crochet de suspension du bassin consiste en un étrier E (*fig.* 34) dont la partie supérieure plane et constituée par une

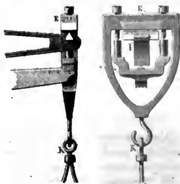


Fig. 34.

matière dure, l'agate, repose sur un couteau d'acier I fixé à l'extrémité du fléau et parallèle à l'axe de suspension A. Enfin, cet étrier se relie au bassin par une articulation libre K. De cette façon, dans tous les mouvements du fléau, la ligne de contact du couteau et de l'étrier sert d'axe de rotation au bassin qui peut toujours, à cause de sa grande mobilité, faire passer, à chaque instant, la verticale de son centre de gravité par cet axe fixe.

Conservation de la balance. — Pour que les pièces métalliques qui entrent dans la construction de la balance ne s'altèrent pas, par leur contact avec l'air humide, l'instrument est renfermé dans une cage de bois vitrée M, où l'on place de la chaux vive ou du chlorure de calcium. Les pesées s'exécutent, en ouvrant les panneaux placés sur le devant de la cage.

84. **Méthode des doubles pesées.** — Comme il est très-difficile de remplir la seconde condition de justesse de la balance indiquée plus haut, l'égalité de longueur des bras du fléau, on s'exposerait à commettre des erreurs graves en se servant de la *pesée simple;* c'est-à-dire en plaçant, lorsque la balance est déjà réglée, le corps à peser dans l'un des bassins et ramenant l'aiguille S au zéro, par des poids gradués placés dans l'autre. Le plus souvent, quand on veut avoir exactement le poids d'un corps, il vaut mieux recourir à la *méthode des doubles pesées*, due à Borda. On met le corps dans l'un des bassins, et on établit l'équilibre par une tare placée dans l'autre : on enlève le corps ; on laisse la tare dans le bassin qu'elle occupe, et on reproduit l'horizontalité du fléau, à l'aide de poids gradués. Ces derniers, agissant à l'extrémité du même bras de levier que le corps et faisant équilibre à la même tare, représentent évidemment son poids, quelque différence qu'il y ait entre les longueurs des deux bras.

Souvent, quand la balance est très-sensible, on arrive trop lentement à réaliser l'horizontalité du fléau ; ce dernier est tellement mobile, que ses oscillations se continuent très-longtemps. On juge alors de l'égalité des poids placés dans les deux bassins par l'égalité des déviations de l'aiguille S, de part et d'autre du zéro, sur l'arc gradué. On peut opérer plus exactement en observant trois arcs de déviation consécutifs a, b, c. Si l'égalité des poids contenus dans les deux bassins existe, on doit avoir $b = \frac{a+c}{2}$.

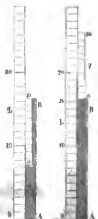
V. — MESURE DES LONGUEURS.

Nous placerons, à la suite de la balance, la description de deux appareils employés très-fréquemment comme elle, dans les recherches physiques, quoique dans un but tout différent.

85. **Vernier.** — Il arrive souvent que la longueur de la ligne droite que l'on veut mesurer, en se servant d'une règle divisée en millimètres, est comprise entre n millimètres et $n + 1$ millimètres. Le but du vernier est

de rendre possible la fixation de la valeur de la fraction qu'il faut ajouter à n pour avoir la longueur cherchée avec une approximation connue.

Supposons qu'il s'agisse d'effectuer la mesure en question à moins de $\frac{1}{10}$ de millimètre près. Le long de la règle graduée fixe L (*fig.* 35) peut glisser une lame plus courte V, dont la longueur absolue est de 9 millimètres; on la divise en 10 parties égales de façon que chacune de ses divisions représente $\frac{9^{mm}}{10}$. Cette lame plus courte constitue le vernier. Veut-on évaluer la longueur AB, on met le point A en regard du zéro de la règle fixe, le point B en contact avec le zéro du vernier (*fig.* 35), et on lit le numéro de la division du vernier qui coïncide avec l'une des divisions de la règle; soit 4 ce numéro. La longueur cherchée est de n millimètres $+ \frac{4^{mm}}{10}$. En effet, la division du vernier qui suit immédiatement la division coïncidente est distante de $\frac{1^{mm}}{10}$ de la division qui lui correspond sur la règle fixe; celle qui vient après sur le vernier, est éloignée de $\frac{2^{mm}}{10}$ de la division de la règle qui la suit, et enfin le zéro du vernier est toujours, à une distance de la division de la règle placée immédiatement au-dessous de lui, d'un nombre de dixièmes de millimètre exprimé par le numéro de la division coïncidente de ce vernier.


Fig. 36. Fig. 35.

On peut encore donner au vernier la position indiquée par la figure 36, en mettant la division 10 en contact avec B; l'évaluation de la fraction demandée s'obtient toujours de la même manière.

Des verniers qui auraient des longueurs de 19 millimètres, 49 millimètres, et qui seraient divisés en 20, 50 parties égales, permettraient d'arriver à une approximation de $\frac{1}{20}$ de $\frac{1}{50}$ de millimètre. Il ne faut pas croire cependant que l'approximation qu'on peut ainsi obtenir n'ait pas de limite. La graduation de la règle et celle du vernier ne sont jamais parfaites; leurs divisions sont égales à $\frac{1}{K}$ de millimètre près. $\frac{1}{K}$ représente donc aussi la limite d'approximation qu'on ne saurait dépasser par l'emploi du vernier. Dans les meilleurs instruments, on ne va guère au delà de $\frac{1^{mm}}{50}$.

86. **Cathétomètre.** — Le but de l'instrument est de mesurer la distance verticale de deux points A et B. A cet effet, une lunette L (*fig.* 37), ayant au foyer de son oculaire deux fils croisés très-fins, se meut le long

d'une règle verticale graduée D, en demeurant perpendiculaire à la règle, de manière à pouvoir être dirigée successivement vers chacun des deux points. La quantité dont la lunette s'est déplacée le long de la règle graduée donne la distance verticale qui sépare les deux points. Comme les points A et B ne se trouvent pas toujours situés sur la même verticale, il faut que la lunette puisse être dirigée dans un azimut quelconque. A cet effet, la règle D est fixée à un manchon cylindrique creux, dans lequel s'emboîte exactement un axe en fer cylindrique qui demeurera fixe et qu'on rendra toujours vertical. La règle parallèle à l'axe peut ainsi tourner avec le manchon en conservant sa verticalité.

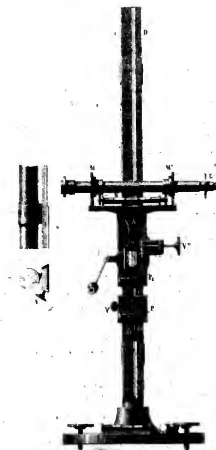


Fig. 37.

Détails de construction. — Le chariot qui porte la lunette est formé de deux parties P, P_1, reliées l'une à l'autre par la vis de rappel V'. Lorsqu'en faisant glisser le chariot à la main, on a amené l'axe de la lunette à peu près dans la direction du point A, par exemple, on fixe P contre la règle D à l'aide de la vis de pression V, puis on se sert de la vis V', dont le pas est très-petit, pour achever de mettre la lunette au point. Une ouverture rectangulaire pratiquée en O dans la partie supérieure du chariot découvre les divisions de la règle, et comme le bord vertical de cette sorte de fenêtre est muni d'un vernier qui se juxtapose à la graduation, il est facile d'évaluer la position actuelle de la lunette sur la règle D à $\frac{1^{mm}}{50}$ près. La lunette avec son niveau à bulle d'air N est posée sur deux fourchettes qui font partie de la pièce métallique X, disposée en forme de T et mobile à l'aide

de la vis de rappel V''', autour d'un axe horizontal. Sur ces fourchettes s'appuient les deux colliers M, M' qui font corps avec le tube de cuivre de la lunette. Ils sont exactement cylindriques et ont la même courbure. L'axe du cylindre qu'ils constituent, par leur ensemble, est précisément l'axe géométrique de la lunette. — Enfin, tout l'instrument est porté par un socle de fonte muni de trois vis calantes et porteur de deux niveaux croisés, dont le plan est perpendiculaire à l'axe de rotation.

Emploi du cathétomètre. — Nous supposerons le cathétomètre bien construit et bien réglé; l'axe optique de la lunette se confond avec son axe géométrique; l'axe du niveau N est parallèle à l'axe de la lunette. Dans ces conditions, l'emploi de l'instrument est des plus faciles. A l'aide des vis calantes du socle et des niveaux croisés, on rend vertical l'axe de fer et, par suite, la règle D qui lui est parallèle. Avec la vis de rappel V'' et en consultant le niveau N, on rend la lunette horizontale. Il n'y a plus alors qu'à viser A et B en prenant les précautions indiquées plus haut et à faire deux lectures, pour noter, chaque fois, la position du zéro du vernier sur l'échelle graduée. On a ainsi, par la différence des nombres obtenus, la distance verticale des deux points A et B exprimée en millimètres et fractions de millimètres.

CHAPITRE II

HYDROSTATIQUE

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES SOUS L'ACTION DE LA PESANTEUR.

87. Principe de Pascal. — Pascal, dans son *Traité de l'*ÉQUILIBRE DES LIQUEURS, énonce ainsi le principe fondamental de l'hydrostatique : « Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, l'une centuple de l'autre ; en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large; et en surmontera quatre-vingt-dix-neuf. Quelque proportion qu'aient ces ouvertures, et quelque direction qu'aient les pistons, si les forces qu'on mettra sur ces pistons sont comme les ouvertures, elles seront en équilibre. »

88. Égale transmission des pressions dans tous les sens. — Le principe formulé par Pascal peut être généralisé de la manière suivante : — Si l'on exerce une pression à la surface d'un liquide en équilibre, sur une

portion plane égale à l'unité de surface (*fig.* 38), l'effort est transmis dans toutes les directions, soit dans l'intérieur du liquide, soit contre la paroi; et sa grandeur est toujours égale au produit de la pression primitive par l'étendue de la surface plane que l'on considère. En d'autres termes, si p est la pression exercée sur la surface s ou $\frac{p}{s}$ la pression sur l'unité de surface, la pression P transmise à une surface S aura pour expression : $P = \frac{p}{s} S$. Comme on déduit de là : $\frac{p}{s} = \frac{P}{S} = \frac{P'}{S'} =$ constante, on peut dire encore que, dans le cas de la transmission des pressions par un liquide en équilibre, la pression rapportée à l'unité de surface demeure invariable.

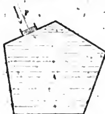


Fig. 38.

Preuve expérimentale de l'égale transmission des pressions dans tous les sens. — Le principe de Pascal étant compris et généralisé, donnons-en une démonstration expérimentale.

On a deux vases cylindriques A et B (*fig.* 39), de sections très-différentes S et s, communiquant ensemble par le tube C et en partie pleins d'eau. Des pistons P et p s'appliquent sur les surfaces libres du liquide dans les deux vases, et on est arrivé, par tâtonnement, à leur donner des poids tels que l'équilibre de tout le système est réalisé. Peu importe que le liquide soit à la même hauteur ou à des hauteurs différentes dans les deux cylindres, nous n'avons pas à nous en inquiéter.

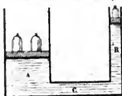


Fig. 39.

L'équilibre est possible, il existe. Or, si à ce moment, nous plaçons un poids de 1 kilogramme sur le piston p, l'expérience nous montre qu'il faut, dans tous les cas, pour empêcher le piston P de se mouvoir, placer sur lui un nombre N de kilogrammes tel qu'on ait $N = \frac{1}{s} S$. C'est la démonstration du principe.

L'expérience que nous venons de décrire représente le point de départ théorique d'un appareil fréquemment employé dans l'industrie, pour transformer des efforts relativement assez faibles, en actions comprimantes très-énergiques ; on le nomme *Presse hydraulique*.

Presse hydraulique. — B (*fig.* 40) est une pompe aspirante et foulante à piston plongeur de petite section. Ce piston, mis en mouvement par un levier à bras inégaux L, fait arriver l'eau dans le corps de pompe A, par l'intermédiaire du tuyau T'. Le piston plongeur de A présente une large section, et, en se soulevant, il peut comprimer fortement tels corps que

l'on voudra contre le plancher fixe F. Dans le canal de communication T' se trouvent : 1° une soupape *a* s'ouvrant de bas en haut et empêchant l'eau de revenir de A vers B; 2° une soupape de sûreté *b* qui s'ouvre lorsque la pression dépasse une limite qui compromettrait la solidité de l'appareil : enfin 3° une vis à filet en partie interrompu *c*, qui, lorsqu'on la fait tour-

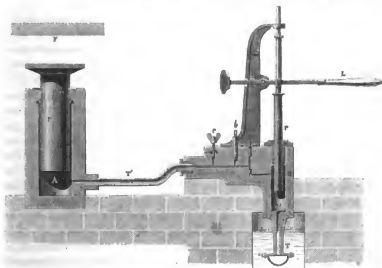


Fig. 40.

ner dans un sens convenable, permet à l'eau contenue en A de s'échapper afin que le grand piston puisse redescendre.

On voit par ces dispositions, que si l'effort exercé à l'extrémité de la grande branche du levier est de 10 kil., si les longueurs des deux bras du levier sont dans le rapport de 1 à 10 et les sections des deux pistons dans le même rapport, l'effort total transmis par le grand piston sera de 1 000 kil. Quant au travail mécanique, il n'aura pas augmenté ; car, lorsqu'il passe un litre d'eau de B en A, ce volume de liquide, se répartissant sur une section 10 fois plus grande, s'élève à une hauteur 10 fois plus petite. Donc, quand l'effort transmis par le grand piston est 10 fois plus grand, le chemin qu'il parcourt est 10 fois plus petit; et, dans tous les cas, le produit de la force par le chemin que parcourt son point d'application, ou le travail mécanique, demeure constant. Il va sans dire qu'ici, comme dans toutes les machines, il y a du travail perdu par le fait des résistances passives.

La presse hydraulique est utilisée, dans l'industrie, pour extraire les liquides contenus dans les tissus de certains végétaux, pour enlever aux graines oléagineuses la matière grasse qu'elles renferment. Elle sert à exercer de

fortes tractions et même à soulever des fardeaux d'un poids considérable.

89. **Direction et grandeur des pressions dans l'intérieur des masses liquides.** — Pour comprendre la raison d'être de ce principe de Pascal, dont nous venons de donner une vérification expérimentale, il suffit de se reporter aux idées générales que nous nous faisons sur la constitution des liquides. Un liquide en équilibre est en général soumis à trois sortes de forces : 1° les actions réciproques de ses molécules, qui font, par exemple, qu'une gouttelette de liquide rendue libre conserve la forme sphérique ; 2° les pressions mécaniques exercées en un point quelconque de sa masse ; 3° la pesanteur, qui peut être considérée comme agissant sur chaque molécule individuellement. Lorsque les deux dernières forces interviennent isolément, ou toutes les deux à la fois, elles occasionnent un rapprochement dans les molécules du milieu, et par suite font naître une pression nouvelle qui n'existait pas quand les actions moléculaires se produisaient seules, pression qui s'exerce, soit dans l'intérieur du liquide, soit contre les parois du vase qui le renferme. Or, si l'on considère la mobilité parfaite des molécules (11) comme caractéristique de l'état fluide, on arrive à cette conclusion : que, pour l'équilibre, la pression sur un élément plan situé sur la paroi ou en un point quelconque de la masse liquide doit toujours être normale à cet élément. En effet, si la résultante des pressions sur un élément m de la paroi (*fig.* 41) ne lui était pas perpendiculaire, elle donnerait, située dans le plan de l'élément, une composante que rien ne pourrait annuler, puisqu'il n'existe que des frottements négligeables ; les molécules liquides glisseraient à la surface de la paroi, l'équilibre serait impossible. Il en est de même en choisissant un élément m' dans l'intérieur du liquide. En effet, faisons passer par l'élément choisi un plan qui divise le vase en deux compartiments A et B : nous ne compromettrons en rien l'équilibre primitif, nous augmenterons même sa stabilité, si, sans modifier les distances ou les positions relatives des molécules de la portion A, nous les rendons solidaires les unes des autres, de manière à les constituer, comme si elles appartenaient à un corps solide. Alors l'élément m' peut être considéré comme appartenant à une paroi, et le raisonnement précédent lui est applicable.

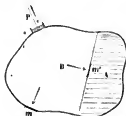


Fig. 41.

Dans tout ce qui suivra, pour qu'on attache un sens précis à ces mots, *pression sur un élément liquide*, nous supposerons toujours implicitement cet élément, d'une épaisseur très-petite, *solidifié*, la solidification étant comprise comme il vient d'être dit.

En second lieu, si l'on se reporte à cette autre propriété bien connue, que l'équilibre est dans les liquides tout à fait indépendant de la forme, qu'il

n'est nullement influencé par la position relative des molécules, mais uniquement par leurs distances (12), on sera conduit nécessairement à cette conséquence, qu'autour d'une molécule donnée tout est symétrique ; que, par suite, pour un élément très-petit, la pression demeurera la même, lorsque, faisant tourner l'élément autour de son centre de gravité, on lui donnera une position quelconque.

Nous sommes ainsi conduits à cet autre énoncé, qui renferme implicitement la formule de Pascal : *Dans l'intérieur d'un liquide en équilibre, la pression exercée sur un élément de surface très-petit est toujours normale à l'élément et indépendante de sa direction.*

Cette proposition est vraie dans toute sa généralité, quelle que soit la grandeur de l'élément, si les forces qui interviennent sont uniquement les actions mutuelles et les pressions mécaniques, ou si du moins ces dernières sont très-grandes par rapport au poids du liquide. Mais, lorsque la pesanteur est la force dominante, comme la pression qu'elle détermine croît avec la profondeur, il y a une restriction à introduire ; l'élément choisi doit être assez petit pour que la pression, en chacun de ses points, puisse être considérée comme constante. Du reste, ce principe, que nous posons ainsi au début, va se trouver rigoureusement établi par la vérification expérimentale de toutes ses conséquences.

90. Première conséquence du principe de Pascal. — **Tranches de niveau.** — *Dans un liquide en équilibre soumis à l'action de la pesanteur, tous les éléments plans, de même étendue, d'une même tranche horizontale supportent la même pression.*

Preuve expérimentale. — On peut rendre manifeste par l'expérience la vérité de cette proposition, en remarquant que, lorsqu'un vase est ouvert, la pression de l'atmosphère qui s'exerce sur la surface libre du liquide représente une action mécanique comparable à celle que transmet un piston qui traverse la paroi d'un vase fermé. Pour prouver l'égalité de pression en tous les points d'une même tranche de niveau, on pourra donc opérer, sans inconvénient, dans un vase ouvert ; la démonstration devra être considérée comme générale. Or, il suffit de prendre un tube plein d'air de la forme indiquée par la figure 42, fermé par le haut, ouvert par le bas, et de faire aboutir constamment son ouverture inférieure O aux différents points d'une même tranche horizontale XY pour constater que l'eau s'élève toujours dans le tube à la même hauteur h. Donc les pressions qui s'exercent sur les éléments de même étendue de la tranche considérée ont même grandeur.



Fig. 42.

91. Reste à montrer que ce théorème, dont l'expérience vient d'établir la

vérité, est bien une conséquence du principe de Pascal. Soient les deux éléments plans, circulaires, très-petits m, m' de même surface appartenant à la tranche horizontale XY (*fig.* 43). Rendons-les verticaux et parallèles, et isolons par la pensée le cylindre liquide mm' qu'ils comprennent entre eux. Supposons toute la masse solidifiée en dehors de mm', et solidifiée comme il a été dit (87). L'équilibre primitif n'est pas troublé. Or, dans l'intérieur du cylindre liquide, deux sortes de pressions peuvent être transmises : les unes, venant de l'extérieur, comparables aux actions mécaniques, se communiquant avec la même intensité dans toutes les directions, déterminent le même effort total de l'intérieur à l'extérieur sur les bases de même surface m, m'. Les autres, dues au poids du liquide que le cylindre renferme, ont toutes des directions verticales, et il n'y a aucune raison, dans les conditions de symétrie offertes par la figure, pour que, sous leur influence, le liquide pesant s'échappe du vase plutôt par m' que par m : c'est dire que l'égalité de pression qui existait pour les deux éléments avant qu'on ne tînt compte du poids du liquide, ne sera point altérée par l'introduction de cette force nouvelle. D'autre part, ce qui a lieu après la solidification partielle que nous venons d'opérer existait auparavant, et les deux éléments très-petits m et m' (89) pourront reprendre leur position horizontale, en tournant autour de leur centre de gravité, sans que les pressions qu'ils supportent cessent d'être égales.



Fig. 43

92. Deuxième conséquence du principe de Pascal. — **Variation de la pression avec la profondeur.** — *Deux éléments plans de même étendue étant situés à des profondeurs différentes dans une masse liquide pesante, l'excès de pression supporté par l'élément inférieur est égal au poids du cylindre liquide qui aurait pour base cet élément et pour hauteur la distance verticale des deux éléments.*

Preuve expérimentale. — Un tube de verre (*fig.* 44), ouvert aux deux bouts peut être hermétiquement clos, à sa partie inférieure, par un disque de même matière O, nommé *obturateur*, qu'on maintient contre l'ouverture du tube à l'aide d'un fil attaché à son centre. On l'enfonce verticalement dans l'eau jusqu'à la tranche X'Y' ; on abandonne le fil et l'on voit que l'obturateur ne tombe pas : ce qui montre que la pression du liquide s'exerce sur lui de bas en haut. Un second appareil identique au précédent quant aux dimensions est enfoncé en même temps jusqu'à la tranche XY. Si, à ce moment,

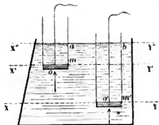


Fig. 44.

pour estimer les pressions supportées de bas en haut par les deux obturateurs, on verse de l'eau dans chaque tube jusqu'à ce que l'obturateur se détache, on trouve que les niveaux *a* et *b* que doit atteindre l'eau sont sur un même plan horizontal X'Y'. Donc, l'excès de pression supporté par *m'* est le poids du cylindre liquide dont la hauteur *bm'* — *am* représente la distance des tranches de niveau XY, X'Y' dans lesquelles sont placés les obturateurs.

93. Faisons voir maintenant que ce résultat est une conséquence du principe de Pascal. Si les deux éléments *m*, *m'* sont situés sur la même verticale et qu'on solidifie (*fig.* 45) toute la masse en dehors du cylindre qu'ils comprennent, on voit que deux sortes de pressions se propagent dans le liquide de ce cylindre. L'une, qui vient de l'extérieur, est transmise avec la même intensité dans tous les sens, et par suite produit le même effet sur les éléments égaux en surface *m*, *m'*. L'autre, variable avec la profondeur, et due uniquement à des forces verticales, est nulle en *m*, et maximum en *m'* où elle est égale à la somme de toutes les actions de la pesanteur sur les molécules liquides, c'est-à-dire au poids du liquide contenu dans le cylindre. Donc *m'* supporte de plus que *m* le poids de la colonne liquide de hauteur *h*. Comme, d'autre part, tous les éléments de même étendue contenus dans le plan horizontal XY qui passe par *m'* supportent la même pression que ce dernier élément, il s'ensuit que la même conséquence s'applique à deux éléments *m* et *m''* non situés sur la même verticale, mais contenus entre des plans horizontaux distants de la même quantité *h*.

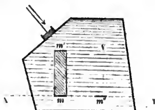


Fig 45.

94. Troisième conséquence. — **Horizontalité de la surface libre dans un liquide.** — *La surface libre d'un liquide pesant doit, pour l'équilibre, être plane et horizontale.*

Preuve expérimentale. — Elle a été déjà donnée au § 43, où nous avons montré que la surface libre d'un liquide est perpendiculaire à la direction du fil à plomb.

D'autre part, la théorie nous conduit à la même conséquence. En effet, tous les éléments égaux en surface de la tranche de niveau XY (*fig.* 46) doivent supporter la même pression (90). Or, l'excès de pression de *m'* sur *m* est égal au poids du cylindre liquide de hauteur *mm'*, l'excès de pression de m'_1 sur m_1 est égal au poids du cylindre liquide de hauteur $m_1m'_1$; comme, d'autre part, la pression de l'atmosphère contre *m* et m_1 est exactement la même, il s'ensuit que

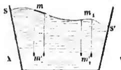


Fig. 46.

les excès en question devraient être égaux. Ceci ne peut avoir lieu qu'autant que la condition $mm' = m_1m'_1$ sera remplie. Donc la surface libre doit être parallèle à XY, et par suite plane et horizontale comme elle.

95. QUATRIÈME CONSÉQUENCE. — **Surface de séparation de deux liquides de densités différentes.** — *La surface de séparation de deux liquides de densités différentes, qui n'exercent pas d'action chimique ni dissolvante l'un sur l'autre, doit, pour l'équilibre, être plane et horizontale.*

Preuve expérimentale. — Dans un tube de verre on introduit du mercure, de l'eau et du chloroforme ; on ferme le tube, on mélange les liquides par l'agitation, et l'on reconnaît qu'après quelques instants de repos les trois liquides se séparent d'eux-mêmes, dans l'ordre suivant : le mercure en bas, puis le chloroforme, et enfin l'eau. — Les surfaces de séparation deviennent planes et horizontales.

95 *bis*. Pour établir par le raisonnement qu'il doit en être ainsi pour l'équilibre, supposons que la surface de séparation de l'eau B et du mercure A soit XY (*fig.* 47). Au point m appartenant à cette surface, considérons les deux éléments de mercure et d'eau en contact. En raisonnant comme plus haut (93), on verrait que le premier élément comparé à m' qui est à la surface libre supporte un excès de pression égal au poids d'un cylindre, en partie de mercure, en partie d'eau et de hauteur totale m'K. Le second élément comparé à m'_1 qui est aussi à la surface supérieure, supporte un excès de pression égal au poids du cylindre d'eau de même hauteur. Pour l'équilibre ces excès doivent être égaux, puisque en m' et en m'_1, la pression de l'atmosphère est la même ; mais cette égalité n'est possible qu'autant que la surface XY sera horizontale. Alors seulement, les deux cylindres de même hauteur et de même base seront constitués uniquement par de l'eau et auront par suite le même poids. En outre, pour que l'équilibre soit stable, les liquides doivent se superposer suivant leur ordre de densité.

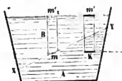


Fig. 47.

96. CINQUIÈME CONSÉQUENCE. — **Pression sur le fond des vases.** — *La pression d'un liquide sur le fond horizontal du vase qui le renferme est, dans tous les cas, égale au poids d'une colonne de liquide ayant pour base le fond et pour hauteur la distance verticale du fond au niveau.*

Preuve expérimentale. — Dans un anneau de cuivre A, tarandé à l'intérieur (*fig.* 48), peuvent être vissées les montures métalliques de trois vases de verre M, M', M" de formes très-diverses. Ces vases, portant tous une ouverture inférieure de même diamètre, peuvent être fermés par le bas à l'aide d'un même obturateur en verre suspendu par un fil à l'une des extrémités du fléau d'une balance. On commence par placer, dans le bassin de la balance, un poids P notablement plus grand que celui de l'obturateur

et on verse de l'eau dans le vase M jusqu'à ce que l'obturateur s'abaisse légèrement pour laisser écouler l'excès d'eau qui pèse sur lui. A ce moment, le poids P fait équilibre au poids de l'obturateur et à la pression supportée par le fond du vase M. — On marque la hauteur du liquide avec un index. On recommence la même expérience avec les deux vases M' et M", et on reconnaît que, le poids P demeurant le même dans le bassin de droite, l'eau doit toujours être versée jusqu'à la hauteur de l'index pour que l'obturateur puisse s'abaisser. Donc la pression sur ce fond mobile demeure invariable, quoique le poids du liquide employé soit très-différent, quand la distance du fond au niveau reste constante.

97. Le raisonnement justifie ce résultat de l'expérience. Il va même plus loin, il donne la valeur de la pression qui s'exerce sur le fond du vase. Soit AB le fond horizontal d'un vase (*fig.* 49), et h la hauteur verticale du liquide qui y est contenu. Quelle que soit la forme de ce récipient, nous savons que tous les éléments plans de même étendue contenus dans la tranche horizontale XY du liquide, en contact avec le fond, supportent la même pression, et qu'en outre, cette pression est, pour chaque élément m, égale à celle que supporte un élément de la surface libre augmenté du poids d'un cylindre liquide de hauteur h. Donc la pression totale sur le fond sera, indépendamment de la pression transmise provenant de l'atmosphère, égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base le fond et pour hauteur la distance du fond au niveau. En un mot, que le vase soit cylindrique, élargi ou rétréci à la partie supérieure, la pression sur le fond demeure constante pourvu que l'étendue superficielle du fond et la hauteur h ne changent pas. Pour les vases élargis vers le haut, la pression sur le fond sera moindre que le poids du liquide; elle lui sera égale dans le cas des vases cylindriques; elle sera plus grande dans le cas d'un vase rétréci vers le haut.



Fig. 49.

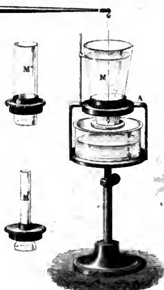


Fig. 48.

98. Sixième conséquence. — **Pression sur les parois latérales des vases.** — *La pression d'un liquide contre la paroi latérale du vase qui le renferme est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base cette paroi et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité au niveau.* — Sur chaque élément très-petit de surface de la paroi latérale C (*fig.* 50), la pression est *normale* et la même que sur tout élément de même étendue de la tranche de niveau qui passe par le centre de l'élément. On a donc, agissant sur la paroi, un ensemble de forces parallèles dont l'intensité croît proportionnellement à la distance du point d'application de chaque force au niveau du liquide. On prouve en mécanique, que la résultante de ces forces parallèles, qui exprime la pression totale sur la paroi C a pour grandeur le poids d'une colonne liquide qui presserait sur le fond horizontal de même étendue d'un vase cylindrique, dans lequel ce liquide s'élèverait à une hauteur égale à la distance du centre de gravité G, de la paroi latérale au niveau. Le point d'application de cette résultante, qu'on nomme *centre de pression*, est nécessairement placé au-dessous du centre de gravité, puisque les forces, au lieu d'être égales, croissent avec la profondeur.



Fig. 50


Fig. 51.

99. **Tourniquet hydraulique.** — Il n'est pas besoin de nouvelles expériences, pour se convaincre de l'existence des pressions exercées par les liquides, sur les parois latérales des vases qui les contiennent. Tout le monde sait quelle forte épaisseur il faut donner aux murs d'un grand réservoir plein d'eau pour qu'ils puissent résister aux pressions intérieures. On a l'habitude de faire, dans les cours, l'expérience du *Tourniquet hydraulique*, dans laquelle un vase V plein d'eau (*fig.* 51) se met à tourner au moment où le liquide s'écoule par des ajutages latéraux disposés comme l'indique la figure. Ce sont évidemment les pressions appliquées aux coudes des ajutages qui, ne se trouvant plus contre-balancées aux points opposés, engendrent le recul ; et par suite la rotation du système en sens contraire de l'écoulement.

La pression n'est plus, il est vrai, égale, dans ce cas, à celle qui s'exer-

çait contre la paroi avant que l'écoulement ne se produisît ; mais elle n'en est pas moins la cause déterminante du recul.

100. Paradoxe hydrostatique. — En partant du principe que nous venons d'établir (96), ne semblerait-il pas que si l'on place sur le bassin d'une balance un vase rétréci par le haut tel que AH (*fig.* 52) et contenant un liquide, la pression sur le fond, qui est supérieure au poids réel du liquide, doit se communiquer, par contact direct, au bassin de la balance et peser sur celui-ci plus fortement que ne le comporte le poids du vase augmenté du poids du liquide? Cette conséquence est évidemment paradoxale. L'expérience justifie ce que le bon sens et la théorie indiquent, à savoir : que la pression sur le bassin est égale simplement à la somme des poids du vase et du liquide.

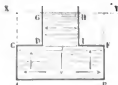


Fig. 52.

En effet, dans un vase quelconque, toutes les parois sont solidaires les unes des autres ; elles constituent par leur ensemble un corps solide unique, dont tous les points de la surface intérieure sont soumis à des actions comprimantes, quand le vase est plein de liquide. Quelle pression communiquera, dans ces conditions, le vase au plateau de la balance? Évidemment la résultante des pressions que lui-même supporte. Prenons un cas simple, donnons au vase la forme ci-dessus (*fig.* 52); les pressions sur CA et FB se détruisent mutuellement comme égales et de sens contraire; il en est de même sur HI et GD. Il reste donc la pression de haut en bas sur AB égale au poids du cylindre liquide AXYB, et les pressions dirigées de bas en haut sur CD et IF, qui s'ajoutent, puisqu'elles agissent dans le même sens, et donnent une résultante représentée en grandeur par la somme du poids des cylindres liquides CDGX, IFYH. La résultante générale des pressions supportées par l'ensemble des parois est donc une force verticale dirigée de haut en bas et égale au poids du cylindre liquide AXYB, moins les poids des colonnes CDGX, IFYH, ou au poids réel du liquide contenu dans le vase.

On démontre que cette conclusion est toujours vraie, quelle que soit la forme du vase, et que, dans tous les cas, les composantes horizontales des pressions qui s'exercent sur les divers éléments des parois se détruisent mutuellement, tandis que les composantes verticales de ces pressions donnent une résultante unique représentée, en grandeur, par le poids réel du liquide.

Qu'on ne se méprenne pas sur le sens de cet énoncé ; il demeure bien entendu que, malgré la neutralisation mutuelle des composantes horizontales de la pression sur la surface intérieure d'un vase, ces composantes n'en constituent pas moins un effort incessant exercé contre ces parois, qui tend à les disjoindre et qui les brise lorsqu'elles offrent trop peu de résis-

tance. Ainsi s'explique l'expérience du *crève-tonneau* de Pascal, dans laquelle, à l'aide d'une minime quantité d'eau introduite dans un tube de verre long et étroit solidement fixé à la bonde d'un tonneau déjà plein de liquide, on peut faire éclater les douves.

101. Septième conséquence. — **Équilibre des liquides dans les vases communiquants.**

Premier cas. — *Lorsque les vases communiquants ne contiennent qu'un seul liquide, il faut, pour l'équilibre, que les niveaux de ce liquide dans les deux vases soient sur un même plan horizontal.* — Le tube de communication C (*fig.* 53) peut être considéré comme un vase distinct des deux autres : si donc nous le remplissons de mercure, par exemple jusqu'à la naissance des vases A et B, la surface libre XY du liquide devra être horizontale (94) ; d'autre part, il résulte du principe de Pascal que si l'on exerce sur chacune des parties de cette surface IK et GS, des pressions mécaniques, il faut, pour l'équilibre, que la pression rapportée à l'unité de surface $\frac{P}{S}$ soit constante (88). Or l'action mécanique dont nous parlons peut être déterminée soit par des pistons, soit par les poids de colonnes liquides convenablement choisies. Si donc nous introduisons du mercure dans chaque vase A et B, il faudra, pour que l'équilibre se maintienne, que les petits cylindres de mercure découpés dans les deux colonnes liquides et ayant pour base l'unité de surface en *m* et *m'* aient même poids, ce qui exige évidemment qu'ils aient même hauteur au-dessus de XY. Donc les niveaux supérieurs des deux colonnes liquides seront contenus dans un même plan horizontal. C'est ce résultat qu'on exprime dans le langage ordinaire en disant, à propos de l'eau qui se meut dans des canaux, qu'elle tend toujours à prendre son niveau.

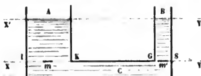


Fig. 53.

102. Second cas. — Au-dessus des colonnes mercurielles de même hauteur XX', YY' déjà introduites et qui s'équilibrent, mettons dans le vase B (*fig.* 54) du mercure et dans le vase A de l'eau ; c'est, de part et d'autre, un accroissement de pression que nous introduisons. Cet accroissement rapporté à l'unité de surface doit être constant ; c'est-à-dire, que les cylindres de même base compris l'un dans la colonne de mercure, l'autre dans la colonne d'eau, doivent avoir même poids. Comme le mercure, à volume égal, pèse 13,598 fois plus que l'eau, il faut que la hauteur du cylindre d'eau soit 13,598 fois

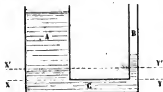


Fig. 54.

plus grande que celle du cylindre de mercure. Concluons de là que, *lorsque, dans des vases communiquants, on introduit des liquides de densités différentes, les hauteurs de ces liquides au-dessus de leur surface commune de séparation, doivent être en raison inverse de leurs densités respectives.*

103. **Preuve expérimentale.** — Premier cas. — Un vase de verre A plein d'eau (*fig.* 55), peut être mis en communication par un tube de cuivre T, muni d'un robinet, avec des tubes de verre de diverses formes T',T'',T''' qu'on introduit successivement dans la tubulure B. On reconnaît, en ouvrant le robinet, que le niveau de l'eau s'élève toujours, dans chacun de ces tubes, à la même hauteur que dans le vase A. Il suffit de placer l'œil à une hauteur telle que le rayon visuel rase la surface certainement horizontale dans le grand vase, pour constater que les surfaces liquides sont, dans les tubes, sur le prolongement de la première.

Second cas. — Un large tube de verre L (*fig.* 56) plonge dans du mercure placé en petite quantité au fond d'une éprouvette de verre.

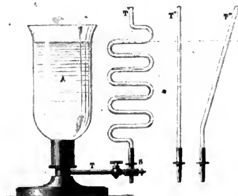


Fig. 55.



Fig. 56.

Cet appareil très-simple constitue en réalité deux vases communiquants: l'un est représenté par la capacité du tube, l'autre par l'espace annulaire compris entre le tube et l'éprouvette. On verse de l'eau dans cet espace; et l'on mesure, avec une lunette mobile sur une règle graduée verticale, les distances des niveaux supérieurs du mercure et de l'eau à la surface de séparation CD: on trouve que les hauteurs des deux colonnes liquides ainsi estimées sont dans le rapport de 1 à 13,598.

104. Application. Niveau d'eau. — La condition de l'équilibre dans les vases communiquants, pour le cas d'un seul liquide, permet d'obtenir à volonté et très-simplement, sur le terrain, une direction horizontale. On se sert à cet effet d'un instrument appelé *niveau d'eau*. Un tube creux de ferblanc ou de cuivre, de $1^m,20$ de longueur environ (*fig.* 57), présente à chaque extrémité une tubulure dans laquelle est mastiquée une fiole cylindrique en verre. Ce tube est porté, en son milieu, par un pied de bois à trois branches P, qui s'appuie directement sur le sol. Après avoir introduit dans l'instrument une suffisante quantité d'eau colorée, on dispose le tube à peu près horizontalement pour que les niveaux de l'eau puissent s'apercevoir dans les deux fioles. Alors, sans autre préparation, l'observateur n'a qu'à se placer de façon à rendre son rayon visuel tangent aux deux surfaces liquides, pour avoir désormais à sa disposition une ligne horizontale invariable XY, qu'il peut prolonger à volonté.

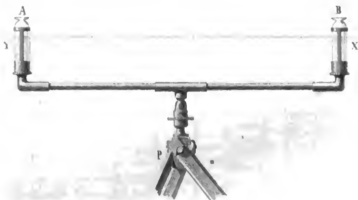


Fig. 57.

Veut-on estimer la distance verticale de deux points A et B pris sur le terrain (*fig.* 58)? on place le niveau entre ces deux points; un aide muni d'une règle qu'il tient verticale et le long de laquelle peut glisser une mire M', se place d'abord en B et appuie sa règle sur le sol. Sur les indications de l'observateur placé près du niveau, il fait ensuite mouvoir lentement la mire, jusqu'à ce que le rayon visuel de ce dernier, rendu horizontal, comme il a été dit plus haut, aille rencontrer le centre de la mire. On lit alors, sur la règle graduée, la distance de ce centre au point B. Cette même expérience est répétée au point A sans toucher au niveau d'eau; la différence des hauteurs observées dans les deux cas donne la distance verticale des deux points.

105. Niveau à bulle d'air. — Pour des nivellements plus précis on a

recours à une lunette portant deux fils croisés au foyer de son oculaire et dont l'axe optique est rendu horizontal par l'emploi d'un niveau à bulle

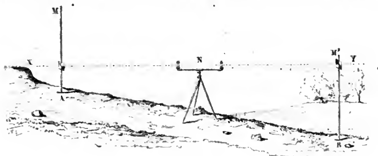


Fig. 58.

d'air disposé parallèlement à cet axe. Ce même niveau sert encore à régler l'horizontalité d'une surface plane.

Voici sa construction : Un tube cylindrique en verre est usé intérieurement de manière que sa surface interne constitue par sa courbure comme un tronçon d'anneau creux. On remplit ce tube d'un liquide très-mobile, l'alcool ou l'éther, en y laissant une grosse bulle d'air qui tendra toujours, pour l'équilibre, à se placer au point le plus haut. On le bouche et on l'introduit dans une monture en cuivre T (*fig.* 59), de manière que la courbure dont nous venons de parler fasse saillie au dehors. Cette monture est fixée à une lame



Fig. 59.

plane de même métal, parallèle au plan tangent au tube, en son milieu M. Dans ces conditions, si le niveau est placé sur une règle horizontale, le plan tangent dont nous venons de parler est lui-même horizontal; M se trouve dès lors le point le plus haut du tube et le milieu de la bulle d'air coïncide avec lui. Des traits O,O marqués sur le verre correspondent à ce moment aux extrémités de la bulle, ce sont les repères centraux; de part et d'autre de ces repères on trace des divisions équidistantes.

Veut-on, avec un instrument ainsi construit, rendre un plan horizontal ? On pose le niveau sur le plan dans une direction quelconque : si la bulle d'air se dirige vers l'extrémité C, cela veut dire que le plan relève trop de ce côté; on l'incline alors peu à peu jusqu'à ce que la bulle se place entre les repères centraux. Une opération identique est effectuée en posant le même niveau sur le plan, dans une direction à peu près perpendiculaire à la première; et comme le mouvement du plan, cette seconde fois, pourrait avoir dérangé l'horizontalité déjà obtenue dans la première direction, on

replace le niveau dans sa position initiale, et ainsi, par une suite de tâtonnements, on arrive à réaliser cette condition : que deux lignes qui se coupent dans le plan soient horizontales l'une et l'autre, le plan l'est alors nécessairement.

Comme les dilatations inégales du verre et du métal, survenant à la suite des variations de température, altèrent le parallélisme de la lame L et du plan tangent au milieu du tube, une vis V, à l'aide de laquelle on fait tourner lentement le tube T autour de C, permet à l'expérimentateur de régler lui-même son niveau. Du reste, avant de l'employer, on doit toujours en vérifier l'exactitude et se servir à cet effet de la méthode du retournement, que nous exposerons en quelques mots.

Si, posé sur une règle qui est à peu près horizontale, l'extrémité de droite de la bulle affleure à la division *n* du niveau, il faut, quand l'instrument est bien réglé, qu'en le retournant de 180°, l'autre extrémité de la bulle, placée cette fois à la droite de l'observateur, affleure, elle aussi, à une division portant le même numéro. Si cette condition n'est pas complétement remplie, on parvient à la réaliser par le tâtonnement, en recourant à la vis V qu'on fait tourner dans un sens ou dans l'autre, comme il vient d'être dit.

CHAPITRE III

PRESSIONS EXERCÉES PAR LES LIQUIDES SUR LES CORPS IMMERGÉS. — MESURE DES DENSITÉS.

106. **Principe d'Archimède.** — Quand un corps est plongé dans un liquide, chaque élément de sa surface extérieure subit une pression normale provenant du liquide environnant. Archimède, le célèbre géomètre de l'antiquité, estima le premier la valeur exacte de la résultante des pressions supportées par le corps immergé.

Le principe qui porte son nom peut être formulé ainsi : *Un corps plongé dans un liquide subit, de la part de ce dernier, une poussée verticale dirigée de bas en haut et égale au poids du volume de liquide qu'il déplace.*

107. Ce principe peut être établi *à priori*, par le raisonnement, en partant des propriétés connues des fluides.

Dans le liquide en équilibre placé dans un vase (*fig.* 60) isolons, par la pensée, une masse de forme quelconque et supposons-la solidifiée. La

solidification étant comprise comme il a été dit § 87, l'équilibre primitif ne sera pas troublé. Cette masse, quoique pesante, ne tombe pas, elle est donc sollicitée par une force, dirigée de bas en haut, égale à son poids et passant par son centre de gravité, laquelle force ne peut dépendre que du liquide environnant. Substituons à la masse considérée un solide de même forme et qui occupe la même place. Le liquide qui baigne le corps n'aura été en rien modifié; la poussée qu'il exercera sur le nouveau solide sera, par suite, la même que tout à l'heure, et celui-ci éprouvera de bas en haut une action verticale qui tendra à le faire monter et dont la grandeur sera égale au poids du volume de liquide qu'il remplace.

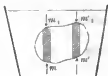


Fig. 60.

Cela revient en définitive à dire, que pour un corps immergé, comme pour les parois d'un vase contenant un liquide (100), les composantes horizontales des pressions sur chaque élément de surface se détruisent deux à deux; et il ne reste que les composantes verticales s'exerçant sur les éléments m, m_1, m', m'_1, lesquelles, se retranchant deux à deux l'une de l'autre, puisqu'elles sont de sens contraire, donnent deux résultantes parallèles égales au poids du volume du liquide qui remplirait l'espace découpé dans le corps par les cylindres mm_1, $m'm'_1$. La résultante générale est alors dirigée de bas en haut, égale et directement opposée au poids du liquide déplacé.

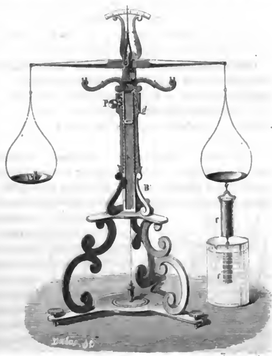


Fig. 61.

108. Démonstration expérimentale du principe d'Archimède. — On se sert d'un cylindre de métal creux C (*fig.* 61), dont la capacité intérieure est égale au volume d'un cylindre mas-

sif C'. Celui-ci est attaché par un crochet à la partie inférieure du cylindre creux, et tout le système est suspendu à l'un des bassins de la balance B, qu'on nomme *Balance hydrostatique*. Cette balance porte une crémaillère K et un pignon P de manière que l'opérateur puisse élever ou abaisser à volonté les fléaux et les bassins. On commence par faire descendre tout le système de manière que le cylindre massif soit exactement immergé dans l'eau d'un vase placé au-dessous de lui, pendant que le fléau tenu à la main est astreint à demeurer horizontal. On marque, à cet instant, la position du doigt *d* sur la crémaillère afin de pouvoir revenir plus tard à cette position initiale. Le fléau est ensuite relevé pour qu'il n'y ait plus immersion du corps solide, et, par une tare convenable placée dans le bassin de gauche de la balance, on fait équilibre dans l'air aux poids des deux cylindres. — Que, par le mouvement du pignon, on abaisse de nouveau le fléau et ses annexes pour les ramener à leur position initiale, l'équilibre sera détruit, et la balance penchera du côté de la tare, parce qu'une portion du cylindre C' plonge dans l'eau. C'est à ce moment de l'expérience qu'on constate que, pour rétablir l'équilibre, il faut remplir exactement d'eau le cylindre creux. D'où cette conclusion : *la poussée de bas en haut sur le corps immergé* est égale au poids du volume d'eau introduit et par suite au poids du volume d'eau déplacé par le cylindre plein.

109. **Conséquences du principe d'Archimède.** — Tout corps immergé M est donc soumis à deux forces de sens contraire : l'une, son poids, agissant de haut en bas et appliquée à son centre de gravité G ; l'autre agissant de bas en haut, la *poussée*, qui, d'après sa définition, passe par le centre de gravité du volume du liquide déplacé. Trois cas peuvent se présenter :

1° Le poids du corps peut être supérieur au poids d'un volume de liquide égal à son propre volume, ou, ce qui revient au même, le poids est plus grand que la poussée. Alors il n'y a pas d'équilibre possible pour le corps dans l'intérieur du liquide ; la résultante des forces qui le sollicitent doit l'entraîner au fond. 2° Le poids peut être égal à la poussée ; dans ce cas, si le corps est homogène, le centre de gravité, et le centre de poussée se confondent (*fig.* 62), et l'équilibre a lieu, quelque position qu'on donne au corps. S'il est hétérogène, il faut, pour l'équilibre, que les centres de gravité et de poussée soient sur une même ligne verticale (*fig.* 63) : en outre, l'équilibre est instable si le centre de gravité est au-dessus du centre de poussée : stable s'il est au-dessous

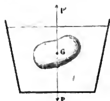


Fig. 62.

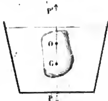


Fig. 63.

(voir 50 et 51). 3° Enfin le poids du corps peut être plus petit que la poussée; alors le corps s'élève au sein de la masse liquide, il devient flottant et demeure immergé d'une quantité telle que le poids du volume de liquide déplacé soit égal à son propre poids. Seulement, il est très-important de remarquer que dans ce dernier cas, pour les corps homogènes, le centre de gravité et le centre de poussée ne se confondent plus.

110. Prenons comme exemple une poutre de bois qui flotte sur l'eau et dont la forme est celle d'un parallélipipède rectangle. Le centre de gravité de la poutre est, nous le savons, en G (*fig.* 64) au point de rencontre des diagonales; le centre de poussée est en O, centre de gravité du parallélipipède immergé; le point O est donc nécessairement au-dessous de G. Il faudra, dans tous les cas, pour l'équilibre, que les deux points soient situés sur la même verticale, et sa stabilité sera d'autant plus grande, quand il s'agira d'un corps hétérogène, que G sera plus bas placé. C'est pour ce motif que dans les navires, les corps les plus lourds et le lest sont placés dans la cale.

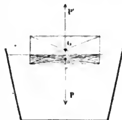


Fig. 64.

111. Mais ce qui distingue le cas que nous étudions de celui du corps complétement immergé, c'est qu'ici, l'équilibre peut, dans certains cas, être stable quoique le centre de gravité soit au-dessus du centre de poussée. La poutre flottante que nous venons de citer en est un exemple. En effet, si l'on dérange cette poutre, d'une petite quantité, de sa position d'équilibre (*fig.* 65), si on la fait pencher vers la droite par exemple, le liquide déplacé change de forme. Par suite, le centre de poussée se porte du côté vers lequel la poutre s'incline; tandis que le centre de gravité, qui est invariable de position dans le corps, se relève et tend dès lors à ramener la poutre à sa position initiale.

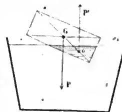
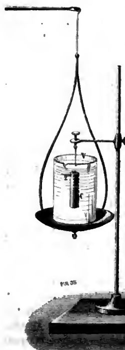


Fig. 65.

112. Une expérience qui se rattache au sujet que nous traitons en ce moment, permet de donner une vérification expérimentale de l'égalité de l'action et de la réaction. Un vase de verre V en partie plein d'eau (*fig.* 66) est posé sur l'un des plateaux de la balance hydrostatique; et on lui fait équilibre par une tare convenable, placée dans l'autre bassin. Le niveau actuel du liquide est indiqué par un index Z collé à l'extérieur du vase. Si l'on vient à immerger complétement dans cette eau, un cylindre de cuivre C, soutenu par un support fixe distinct de la balance, l'expérience montre que le fléau penche du côté du vase et que, pour rétablir l'équilibre, il faut,

avec une pipette, enlever de V un volume d'eau égal au volume du cylindre C, c'est-à-dire ramener le liquide à son niveau primitif Z. Or, nous savons déjà, par le principe d'Archimède (106), que le cylindre immergé éprouve, de bas en haut, une poussée verticale égale au poids du volume de liquide déplacé. Cette poussée provoque une réaction en sens contraire de la part du cylindre, réaction qui est bien égale à l'action, puisque nous venons de voir qu'elle détermine du côté du vase V, comme une augmentation de poids égale en grandeur au poids du volume d'eau dont le cylindre a pris la place.


Fig. 66.

POIDS SPÉCIFIQUES.

113. Poids spécifiques des corps. — Les corps de nature diverse pris sous le même volume, possèdent des poids très-différents. La question des corps flottants (110), entre autres, nous a montré combien il importe de connaître exactement *la valeur du rapport du poids d'un corps au poids d'un égal volume d'eau. C'est ce rapport qu'on nomme poids spécifique.* S'il est égal à 2, 3, 4, cela veut dire que, prise sous le même volume, la substance en question pèse 2, 3, 4 fois autant que l'eau.

Cette définition a été adoptée par les physiciens de tous les pays; en France, toutefois, on en donne souvent une autre qui a sa raison d'être dans l'adoption du système métrique. Comme, chez nous, c'est le poids de l'unité de volume de l'eau à 4° qui est l'unité de poids, on peut dire : *Le poids spécifique d'un corps, c'est le poids de l'unité de volume de ce corps.* En effet, si le poids spécifique d'un corps est 4, cela signifie, d'après la première définition, qu'à volume égal, le corps pèse quatre fois autant que l'eau, d'où il est aisé de conclure qu'un centimètre cube de ce corps pèse 4 grammes. Ce nombre 4 exprime donc le poids spécifique tel qu'il a été défini soit en premier, soit en second lieu. Si D est le poids spécifique, V et P le volume et le poids d'un corps, on aura par suite la relation : $P = VD$, dans laquelle, il ne faut pas l'oublier, P et V doivent toujours être exprimés

en unités correspondantes; si V est mesuré en centimètres cubes, P sera évalué en grammes; si V est rapporté au décimètre cube, P le sera au kilogramme, etc. En appelant D et D' les poids spécifiques de deux corps, d et d' leurs densités, c'est-à-dire les *masses sous l'unité de volume*, on aura, d'après le principe établi (28) $\frac{D}{D'} = \frac{d}{d'}$. C'est cette proportionnalité entre les *poids spécifiques* et les *densités* qui fait que, dans le langage ordinaire, on emploie souvent les deux termes l'un pour l'autre, quoique, au fond, leur signification soit différente.

La formule $P = VD$ est très-fréquemment employée; elle permet, en particulier, d'obtenir le volume d'un corps irrégulier, quand on connaît son poids absolu P et son poids spécifique D: car on a alors $V = \frac{P}{D}$.

On en tire encore $D = \frac{V}{P}$, d'où cette autre définition du poids spécifique: *C'est le rapport du poids d'un corps à son volume.* Il ne faut pas oublier que, dans ce cas, le poids et le volume sont représentés par des nombres abstraits.

114. **Détermination des poids spécifiques des solides et des liquides.** — Nous déduisons de ce qui précède que la mesure des poids spécifiques nécessitera toujours deux déterminations : 1° le poids du corps, 2° son volume à une température déterminée, 0°, par exemple, ou ce qui revient au même le poids d'un volume égal d'eau à 4°; car, pour l'eau prise à cette température, le nombre qui donne le poids exprime en même temps le volume. Le quotient de ces deux nombres sera le poids spécifique cherché.

Nous nous occuperons uniquement dans ce chapitre des poids spécifiques des solides et des liquides, en supposant toujours le corps à 0°, et l'eau à 4°. Comme ces conditions de température sont difficiles à réaliser dans le cours des opérations, les nombres obtenus doivent subir des corrections que nous apprendrons à faire dans le livre de la Chaleur. Trois méthodes peuvent être employées pour la recherche des poids spécifiques : 1° la méthode de la balance hydrostatique, 2° celle du flacon, 3° celle des aréomètres.

115. **Méthode de la balance hydrostatique.** — 1° *Corps solides.* — Un fragment du corps est suspendu par un fil de platine fin au crochet de l'un des plateaux de la balance hydrostatique, et on établit l'équilibre dans l'air avec une tare placée dans l'autre bassin. — Puis, on fait plonger le corps dans l'eau distillée; et par des secousses, ou en frottant sa surface avec un pinceau de fil de platine, on produit le dégagement des bulles d'air adhérentes. L'équilibre est détruit, la balance penche du côté de la tare; on le rétablit avec des poids gradués P_1, qui expriment, d'après le principe d'Archimède, le poids d'un volume d'eau égal au volume du corps, $\frac{1}{\pi_1}$.

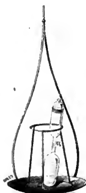
On enlève le corps; on laisse sous le bassin le fil qui le supportait, et on rétablit une troisième fois l'équilibre par des poids gradués P; ils représentent le poids du corps. On a finalement $D = \frac{P}{P_1}$. — Il est facile de voir qu'en suivant cette marche, la méthode des doubles pesées a été seule employée à la fixation du poids du corps et du poids du volume d'eau qu'il déplace.

116. 2° *Corps liquides.* — Une boule de verre lestée avec du mercure (*fig.* 67) est suspendue, par un fil fin, au crochet de l'un des bassins de la balance hydrostatique et équilibrée dans l'air avec une tare. On l'immerge successivement dans le liquide sur lequel on expérimente et dans l'eau, en rétablissant chaque fois l'horizontalité du fléau par des poids gradués P, P_1. Ceux-ci représentent les poids de volumes égaux du liquide et de l'eau. Donc $\frac{P}{P_1}$ sera le poids spécifique cherché.


Fig. 67.

117. **Méthode du flacon.** — 1° *Corps solides.* — Un flacon à large goulot (*fig.* 68) est exactement rempli d'eau, fermé avec un obturateur plan en verre, et placé à côté d'un fragment du corps solide, dans l'un des bassins d'une balance. — On fait équilibre à ce système avec une tare ; puis on enlève le corps pour lui substituer des poids gradués P, produisant le même effet que lui. P est le poids du solide. — Les poids gradués P étant enlevés, on introduit le corps dans le flacon, en expulsant avec soin les bulles d'air adhérentes; il sort de ce flacon un volume d'eau égal au volume du corps. — Enfin l'obturateur étant replacé sur l'ouverture et le flacon essuyé, on rétablit, par des poids gradués P_1, l'équilibre primitif. $\frac{P}{P_1}$ sera le poids spécifique du corps. C'est encore le procédé des doubles pesées qui a été utilisé dans ce nouveau cas.


Fig. 68.


Fig. 69.

118. 2° *Corps liquides.*—On donne au flacon la forme ci-contre (*fig.* 69), et on le place sur un support métallique destiné à faciliter les pesées. Le flacon étant plein du liquide voulu, on le plonge dans la glace fondante, puis on retire ou l'on ajoute du liquide avec une pipette bien effilée, afin qu'à la température de 0° le flacon soit

exactement plein jusqu'au trait α. Après lui avoir laissé reprendre la température de l'air extérieur, on le porte dans le bassin d'une balance, en l'équilibrant avec une tare.

Le flacon est ensuite vidé, lavé et séché; on le rétablit sur son support dans le même bassin, et les poids gradués qu'on ajoute, pour ramener le fléau à l'horizontalité, donnent le poids P d'un volume de liquide à 0° égal au volume du flacon jusqu'au trait α. Les mêmes opérations sont faites avec l'eau distillée; et si les poids gradués nécessaires sont cette fois égaux à P_1, $\frac{P}{P_1}$ sera le poids spécifique du liquide obtenu dans des conditions très-favorables; car il n'y aura pas de correction nécessaire pour ramener le liquide à 0°; et la correction concernant l'eau sera elle-même très-petite, puisque de 0° à 4° la variation de densité de ce liquide est peu considérable. — On ferme le flacon avec le bouchon B, toutes les fois que le liquide employé est très-volatil, car on a à craindre qu'une partie ne se volatilise pendant le temps de l'opération.

La méthode que nous venons de décrire doit être préférée à toute autre quand on veut obtenir avec précision le poids spécifique d'un liquide. Elle a de plus l'avantage d'être même applicable, dans le cas où l'on ne dispose que d'une petite quantité de liquide.

119. Méthode des aréomètres. — Les aréomètres sont des flotteurs en verre ou en métal; ils sont lestés, à leur partie inférieure, avec du mercure ou de la grenaille de plomb, afin que, plongés dans un liquide, ils présentent une grande stabilité dans leur équilibre. On en distingue de deux sortes : les aréomètres à volume constant et les aréomètres à poids constant. Dans la première catégorie, se trouvent les aréomètres de Nicholson et de Fahrenheit que nous allons d'abord étudier.

120. Aréomètre de Nicholson. — C'est une véritable balance destinée à évaluer le poids spécifique des solides. Il se compose d'un cylindre creux C (*fig.* 70), en fer-blanc ou en cuivre, terminé de part et d'autre par des cônes de même métal A et B. Le cône supérieur A porte, suivant le prolongement de son axe, une tige déliée surmontée d'une capsule K. Le cône inférieur B, muni d'un crochet, soutient un panier M lesté par de la grenaille de plomb. L'instrument a un poids tel que, plongé dans l'eau distillée, l'affleurement ait lieu un peu plus haut que la base du cône A. Veut-on déterminer le poids

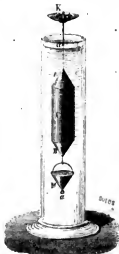


Fig. 70.

spécifique d'un corps solide, voici la marche des opérations : 1° L'aréomètre plongeant dans l'eau, on place sur la capsule K un fragment du corps avec une tare suffisante pour que l'instrument affleure au trait α marqué sur la tige. 2° On enlève le corps, et on le remplace par des poids gradués P capables de produire le même affleurement ; ces poids représentent évidemment le poids vrai du corps dans l'air. 3° On enlève les poids en laissant la tare, et on place le corps sur le panier M ; l'aréomètre n'affleure plus en α, à cause de la poussée subie par le corps solide ; les poids gradués P_1, nécessaires pour rétablir l'affleurement primitif, donnent le poids d'un volume d'eau égal au volume du corps. $\frac{P}{P_1}$ est donc le poids spécifique cherché.

Si le corps solide a un poids spécifique moindre que celui de l'eau, on le place au-dessous du panier M, qu'on a retourné en le suspendant par l'anneau *a*; seulement, dans ce cas, il faut prendre garde de laisser adhérentes au corps quelques bulles d'air, dont le panier renversé empêcherait le dégagement.

121. Cet instrument très-simple et peu coûteux sert fréquemment aux minéralogistes pour l'évaluation prompte des poids spécifiques des minerais et des roches. Il dispense de l'emploi d'une balance dont le transport en voyage serait très-incommode. Malheureusement, il ne peut jamais fournir des indications très-précises. Pour faire de bonnes pesées il faut qu'une balance soit juste et sensible. Or, ces deux qualités manquent, du moins en partie, à l'aréomètre de Nicholson ; sa sensibilité est faible et variable ; elle dépend de la viscosité du liquide dans lequel plonge l'instrument ; sa justesse se trouve altérée par les actions capillaires qui s'exercent dans le voisinage du trait d'affleurement. On peut, il est vrai, accroître cette sensibilité, en diminuant le diamètre de la tige supérieure ; car la section du nouveau cylindre liquide déplacé par l'instrument, quand on ajoutera un nouveau poids sur la capsule, étant alors plus petite, la hauteur de ce cylindre sera plus grande et le mouvement de l'aréomètre, dans le sens vertical, sera plus étendu. Mais on ne peut, dans cette voie, dépasser une limite fort restreinte, puisque la tige doit toujours conserver assez de rigidité pour ne pas fléchir sous le poids de la capsule et des corps qu'on y dépose. Au reste, le défaut que nous reprochons à la balance de Nicholson ne lui est pas particulier, il appartient aux aréomètres en général ; ces appareils pèchent tous par leur peu de sensibilité.

122. **Aréomètre de Fahrenheit.** — Cet instrument, destiné à mesurer le poids spécifique des liquides, a la même forme que le précédent. Il est en verre, afin qu'on puisse le plonger dans des liquides qui attaqueraient les métaux ; de plus le panier M de l'aréomètre de Nicholson a été remplacé ici par une boule lestée S qui fait corps avec le flotteur (*fig.* 71). Soit

P le poids de l'aréomètre dans l'air; on le plonge dans le liquide voulu en plaçant sur la capsule K les poids gradués p' nécessaires pour produire l'affleurement au trait α; $P + p'$ représentent le poids du volume du liquide déplacé par l'aréomètre jusqu'à ce trait. La même opération est répétée dans l'eau, p étant le poids à ajouter sur la capsule, $P + p$ est le poids d'un volume d'eau égal au volume de l'aréomètre jusqu'au point d'affleurement; donc $\frac{P+p'}{P+p}$ est le poids spécifique du liquide.



Fig. 71.

123. Aréomètres à poids constant. — Les aréomètres à poids constant sont formés d'un tube en verre cylindrique portant, à sa partie inférieure, une boule ou un renflement qui contient le lest. La graduation est habituellement tracée sur une bande de papier fixée dans l'intérieur du tube. Ils ne servent que pour les liquides. Tantôt ils doivent fournir une indication prompte sur le degré de concentration des dissolutions salines, des acides du commerce, des liqueurs alcooliques. Dans ce cas, il importe peu d'avoir le poids spécifique de la substance examinée, il suffit que tous les aréomètres destinés à l'examen d'un même groupe de corps, portent une graduation telle que, plongés dans le même liquide, au même degré de concentration, ils marquent tous le même degré. Tantôt, on doit pouvoir déduire immédiatement de l'indication de l'instrument le poids spécifique du liquide étudié : l'aréomètre devient alors un *densimètre*.



Fig. 72.

124. Pèse-sels, — pèse-acides, — graduation. — Dans le premier groupe se trouvent les aréomètres gradués par Baumé et qui portent son nom. On les destine, les uns aux liquides plus denses, les autres aux liquides moins denses que l'eau. La graduation conventionnelle adoptée pour les premiers est la suivante : l'aréomètre est d'abord lesté de manière à ce que, plongé dans l'eau, il affleure vers la partie supérieure. — On marque 0 au point d'affleurement (*fig.* 72); on fait ensuite une dissolution de 15 parties de sel marin desséché dans 85 parties d'eau, dissolution dont le poids spécifique à la température de 12°,5 est de 1,116 et dans laquelle, par suite, le même aréomètre s'enfonce moins que dans l'eau pure. — On marque 15 au nouveau point d'affleurement. — L'intervalle de 0 à 15 est divisé en 15 parties d'égale longueur, et les divisions sont prolongées jusqu'à la naissance du renflement inférieur. Un aréomètre ainsi gradué marque 66° dans l'acide sulfurique au

maximum de concentration, 36° dans l'acide nitrique du commerce, etc.

125. **Pèse-esprit, — pèse-éther, — pèse-bière.** — Quand l'aréomètre est destiné aux liquides moins denses que l'eau, son point d'affleurement dans ce dernier liquide doit se trouver vers la partie inférieure du tube cylindrique en un point où l'on marque 10 (*fig.* 73). — On inscrit ensuite 0 au point où il s'arrête dans une dissolution formée de 90 parties d'eau et de 10 parties de sel marin dont le poids spécifique est de 1,0847. L'intervalle des deux traits est divisé en 10 parties égales, et les divisions sont prolongées jusqu'à l'extrémité supérieure du tube.


Fig. 73.

126. **Alcoomètre centésimal.** — Pour les liqueurs alcooliques, l'indication purement conventionnelle de l'aréomètre de Baumé ne suffit pas. On a besoin, dans beaucoup de cas, de connaître le volume d'alcool absolu que contiennent 100 volumes d'un liquide formé d'alcool et d'eau. C'est pour satisfaire à cette nécessité, qu'a été construit par Gay-Lussac un aréomètre spécial qu'on nomme l'*alcoomètre centésimal*. La forme ordinaire des aréomètres est conservée, seulement la tige est d'un plus petit diamètre.

La graduation présentait ici quelques difficultés exceptionnelles. En effet, quand on mélange ensemble n volumes d'eau et n' volumes d'alcool, le volume après le mélange est plus petit que $n+n'$. Il y a toujours *contraction;* et cette contraction est variable avec les proportions des deux liquides employés. Il faut dès lors, pour construire le premier alcoomètre étalon, obtenir par plusieurs essais directs dans des liquides de composition connue, un grand nombre de points de repère à diverses hauteurs de l'échelle alcoométrique. La méthode suivie par Gay-Lussac revient à ceci : 1° marquer 0 au point où l'alcoomètre affleure dans l'eau pure à la température de + 15° et lester l'instrument de manière à ce que ce point soit placé vers le bas de la tige ; 2° introduire dans une série de vases distincts : dans l'un 10 centimètres cubes d'alcool pur, dans l'autre 20 centimètres cubes, etc., et dans tous, parfaire ensuite avec l'eau distillée un volume de 100 centimètres cubes ; 3° plonger dans chaque liqueur à 15° l'alcoomètre à graduer, et marquer aux affleurements successifs les nombres 10, 20, 30, etc. Il est clair que les points d'affleurement d'un instrument ainsi construit donneront immédiatement, dans toute liqueur où il n'existera que de l'alcool et de l'eau, la proportion pour cent en volume de l'alcool pur qui y sera contenu.

Comme on peut opérer à des températures autres que 15° et que les liqueurs alcooliques éprouvent des variations de volume très-notables par le fait du changement de température, il faut, chaque fois, noter le degré thermométrique de la liqueur afin d'être en mesure d'effectuer la correc-

tion nécessaire. Les éléments en ont été calculés par Gay-Lussac dans une table à double entrée qui donne, pour les différents degrés alcoométriques et pour les températures ordinaires, la correction correspondante.

Une fois l'étalon obtenu, on gradue les autres alcoomètres par comparaison. On les plonge à cet effet dans des dissolutions alcooliques dont l'instrument type a déjà fourni le titre, ce qui donne un certain nombre de points de la graduation. Les autres points s'obtiennent en divisant les intervalles des précédents en longueurs proportionnelles aux divisions correspondantes de l'alcoomètre étalon.

127. **Principe des volumètres.** — Dans le second groupe des aréomètres à poids constant se trouvent les volumètres et les densimètres. Voici le principe théorique de leur construction. Supposons un cylindre parfaitement régulier qui, à partir d'un trait où est inscrit le nombre 100, porte 100 divisions d'égale longueur correspondant par suite à des capacités égales. Imaginons, de plus, que ces divisions aillent du point 100 jusqu'à l'extrémité inférieure de l'instrument où se trouve le zéro de la graduation. Le cylindre a un poids tel que, immergé dans l'eau, il affleure à la division 100. N'est-il pas évident que si, plongé dans un liquide quelconque plus dense que l'eau, il affleure à la division 80, la densité de ce liquide sera $\frac{100}{80}$, et, en général, s'il affleure à la division N, la densité du liquide sera $\frac{100}{N}$? En effet le liquide en question de densité d, pris sous le volume 80, pèse autant que l'eau de densité 1 sous le volume 100. Mais, quand les poids de deux corps sont les mêmes, les volumes sont en raison inverse des poids spécifiques ; on aura donc $\frac{d}{1}$ ou $d = \frac{100}{80}$ et en général : $d = \frac{100}{N}$, quand l'affleurement aura lieu à la division N.



Fig. 74.

128. **Volumètres pour les liquides plus denses que l'eau.** — La forme est celle d'un aréomètre ordinaire (*fig.* 74), la tige étant choisie aussi cylindrique que possible. Quant à la graduation, elle exige deux opérations : 1° immersion dans l'eau. — Le point 100 est marqué à l'affleurement qui doit avoir lieu vers le haut de la tige ; 2° immersion dans un liquide dont le poids spécifique connu est 1,25 par exemple. — Il reste à savoir quel est le numéro qui doit être placé en regard du nouvel affleurement. — Dans ce but faisons $d = 1{,}25$ dans la formule $d = \frac{100}{N}$ et tirons-en la valeur de N ; on trouve ainsi $N = 80$. On inscrira donc 80 au point d'affleurement, et on divisera l'intervalle de 100 à 80 en 20 parties d'égale longueur que l'on prolongera jusqu'au renflement inférieur. Le volumètre étant ainsi divisé, il

suffira, pour avoir le poids spécifique d'un liquide quelconque, de plonger l'instrument dans ce liquide et de diviser 100 par le numéro d'affleurement.



Fig. 75.

129. Volumètres pour les liquides moins denses que l'eau. — La méthode de graduation est la même. Mais le point 100 qui représente l'affleurement dans l'eau est placé vers le bas de la tige (*fig.* 75) ; on plonge ensuite le flotteur dans un liquide dont le poids spécifique antérieurement déterminé est 0,80 par exemple ; il s'enfonce plus que dans l'eau. Au point où il s'arrête, on marque 125, ce chiffre se déduisant de la formule $d = \frac{100}{N}$ dans laquelle on fait $d = 0{,}80$; enfin, on divise en 25 parties égales, l'intervalle compris entre 100 et 125, et l'on prolonge les divisions jusqu'au haut de la tige.

130. Les aréomètres de Baumé sont des volumètres. — On le voit maintenant, les aréomètres de Baumé, gradués comme nous l'avons indiqué, ne sont, au fond, que des volumètres pouvant aussi donner la densité du liquide où ils sont plongés, à l'aide d'un calcul très-simple. S'agit-il des pèse-acides? Tandis que, dans les volumètres ordinaires, une division de la tige représente la 100ᵐᵉ partie du volume total plongé dans l'eau, dans le pèse-acides, une division de la tige est $\frac{1}{144{,}3}$ de ce même volume. Pour le prouver, soit V le volume de la partie plongée de l'aréomètre jusqu'au 0, V — 15 sera

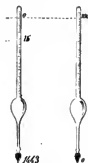


Fig. 76.

le volume de la partie immergée dans le liquide dont le poids spécifique est 1,116 (124) (en prenant pour unité de volume, le volume d'une des divisions de la tige). Or le poids de l'aréomètre étant constant, dans les deux cas, on aura la relation : $\frac{V}{V-15} = \frac{1{,}116}{1}$ d'où $V = \frac{15 \times 1{,}116}{0{,}116} = 144{,}3$. Le pèse-acides ressemble donc à un volumètre à échelle renversée (*fig.* 76); car le chiffre 144,3, au lieu d'être inscrit au point d'affleurement dans l'eau, comme cela a lieu pour le chiffre 100 du volumètre ordinaire, correspond, au contraire, au point le plus bas du pèse-acide. Or, si dans le volumètre ordinaire l'échelle était retournée et que 0 remplaçât 100, le chiffre 20 remplacerait 80; le chiffre 30, 70, etc. ; le poids spécifique serait évidemment donné par la formule $d = \frac{1}{100-N}$, N étant l'indication du volumètre. Donc, dans le cas des pèse-acides, la densité sera déduite de l'expression $d = \frac{144{,}3}{144{,}3-N}$ ou $d = \frac{1}{1 - 0{,}00693N}$.

131. S'agit-il du *pèse-liqueur* de Baumé ?

Chaque division de la tige est $\frac{1}{128}$ du volume total qui plonge dans l'eau, c'est-à-dire du volume compris entre le point 10 et le point le plus bas de l'aréomètre (*fig.* 77). En effet, le liquide qui donne le point 0, ayant un poids spécifique égal à 1,0847, si nous nommons V le volume de la portion inférieure de l'aréomètre, à partir du point 10, on aura comme tout à l'heure :

$$\frac{V}{V-10}=\frac{1,0847}{1},$$

$$\text{ou}\quad V=\frac{10\times 1,0847}{0,0847},\ V=128.$$

Avec les volumètres, on obtient le poids spécifique d'un liquide en divisant 100 par le nombre de divisions immergées, au moment où l'instrument flotte en équilibre ; de même, avec le pèse-liqueur de Baumé, on devra, dans le même but, diviser 128 par le même nombre. Or, on voit, de suite, sur la figure 77, que, d'après la graduation adoptée pour le pèse-liqueur, le nombre N de divisions immergées est égal à $118+n$, si n désigne l'indication de l'aréomètre. On aura donc généralement $d=\frac{128}{118+n}=\frac{1}{0,9213+0,00781.n}$.



Fig. 77.

132. Autre graduation des volumètres. — Au lieu de recourir à des liquides de densités connues pour graduer les volumètres, on peut arriver au même résultat par le seul emploi de l'eau, du mercure, d'une balance et de poids gradués. Supposons qu'il s'agisse des volumètres destinés aux liquides moins denses que l'eau. On laisse l'aréomètre ouvert par le haut et on le pèse avec le lest actuel qu'il renferme. Soit P son poids. Dans l'eau il affleure au point a où nous marquons 100 (*fig.* 78); introduisons un poids p de mercure par l'extrémité ouverte; le poids de l'appareil sera devenu $P+p$, il s'enfoncera dans l'eau davantage, en b par exemple, et le nouveau volume déplacé sera, au volume primitif, dans le même rapport que les poids $P+p$ et P. On aura donc à inscrire en b, le numéro N donné par la formule : $\frac{N}{100}=\frac{P+p}{P}$, d'où $N=100\ \frac{P+p}{P}$. Si p est pris égal au $\frac{1}{4}$ de P, on aura, comme tout à l'heure, $N=125$ (*fig.* 79). Le tracé des divisions sera fait alors, comme il a été dit précé-



Fig. 78. Fig. 79.

demment. On rétablira enfin le lest primitif et on fermera l'aréomètre à la partie supérieure.

133. **Densimètres.** — La méthode que nous venons d'exposer suppose, comme les précédentes, que la tige du volumètre est parfaitement cylindrique. Cette condition étant impossible à réaliser, les indications fournies manquent toujours d'exactitude. On peut, en multipliant les essais, parvenir cependant à s'affranchir de cette cause d'erreur. Reprenons la dernière formule qui a été écrite $\frac{N}{100}=\frac{P+p}{P}$; comme $\frac{100}{N}$ exprime le poids spécifique d'un liquide dans le cas des volumètres, on a $\frac{N}{100}=\frac{1}{d}$ Substituant, il vient $d=\frac{P}{P+p}$. En donnant alors successivement à d, dans cette formule, la valeur 0,9; 0,8, etc.., pour en déduire les valeurs correspondantes de p, on aura les poids de lest qu'il faut ajouter à l'aréomètre pour que, plongé dans l'eau, il donne, par ses affleurements successifs, les points où doivent être inscrits les nombres 0,9; 0,8, etc. (*fig.* 80). La graduation terminée, on ôtera l'excédant de lest qu'on vient d'introduire, on fermera le tube, et désormais, il suffira de plonger l'aréomètre dans un liquide quelconque pour qu'une simple lecture sur la tige de l'instrument donne, sans calcul, le poids spécifique de ce liquide : nous aurons construit ainsi un *densimètre rationnel*.



Fig. 80.

Pour les liquides plus denses que l'eau, le procédé de graduation est le même ; seulement on ôte du lest au lieu d'en ajouter, et la formule devient $d=\frac{P}{P-p}$.

134. **Cas particuliers concernant la mesure des poids spécifiques.** — 1° *Corps solides solubles dans l'eau.* — On prend, dans ce cas, un liquide intermédiaire dans lequel le corps solide ne soit pas soluble. L'huile d'olive ou l'essence de térébenthine, par exemple, quand il s'agit du sucre. On détermine par les méthodes ordinaires la densité du sucre par rapport à l'huile, c'est-à-dire le rapport des poids de volumes égaux de sucre et d'huile, $\delta=\frac{P_s}{P_h}$. Puis la densité de l'huile par rapport à l'eau $\delta'=\frac{P_h}{P_e}$; le produit $\delta\delta'$ des deux densités sera égal à $\frac{P_s}{P_e}$; ce sera donc le poids spécifique du sucre.

135. 2° *Corps renfermant des cavités nombreuses dans leur intérieur, vulgairement nommés poreux.* — Dans ce cas, on peut se proposer deux sortes de déterminations de poids spécifique. 1° Quand le corps est considéré sous son volume réel, c'est-à-dire en ne tenant compte que de la matière qui le forme, abstraction faite des cavités qu'il renferme ; ou bien, 2° en le

prenant sous le volume apparent, c'est-à-dire en cherchant le rapport du poids du corps au poids d'un volume d'eau égal à son volume extérieur. Cette distinction a de l'importance, dans le cas des bois, par exemple. Car on a reconnu que la matière qui forme les différents bois, matière où la cellulose domine, a une densité sensiblement constante; tandis que ces bois eux-mêmes, très-inégalement poreux, ont des poids spécifiques qui varient depuis 0,24 pour le liége jusqu'à 1,33 pour l'ébène.

136. Pour obtenir la densité sous le volume réel, on se sert de la méthode du flacon. Le corps est réduit en poudre, et, après l'avoir plongé dans l'eau, on a le soin de laisser longtemps le flacon ouvert, sous le récipient de la machine pneumatique, où le vide est maintenu, afin de faire dégager les bulles d'air intercalées entre les particules de matière. L'opération s'achève ensuite à la façon ordinaire.

137. Pour évaluer le poids spécifique d'un corps sous son volume apparent, on le pèse dans l'air; soit P son poids. On le recouvre d'une couche mince de cire; l'augmentation de poids p représente le poids de la cire employée dont le poids spécifique d est déjà connu. Enfin, on prend le poids P' du corps enduit de cire et plongeant dans l'eau. Ce nombre P' représente le poids P du corps, plus le poids p de la cire, moins le poids d'un volume d'eau $\frac{P}{x}$ égal au volume extérieur du corps (x étant le poids spécifique cherché), moins le poids $\frac{p}{d}$ d'un volume d'eau égal au volume de la cire. On peut donc écrire :

$$P' = P + p - \frac{P}{x} - \frac{p}{d},$$

d'où

$$x = \frac{P}{P - P' + p\left(1 - \frac{1}{d}\right)}.$$

138. 3° *Corps solides qu'on ne peut mettre en contact avec les liquides.* — Enfin, il est des substances telles que les poudres destinées aux armes à feu, dont les grains, formés par la juxtaposition de matières hétérogènes, ne peuvent être plongés dans les liquides qui les mouillent, sans éprouver des altérations qui changent leur poids spécifique. Dans ce cas, on détermine le volume de la substance en la mettant exclusivement en contact avec une atmosphère gazeuse; et on se sert, à cet effet, d'un appareil nommé le *voluménomètre*, que nous décrirons plus loin comme application de la loi de Mariotte. Le rapport du poids au volume donne alors le poids spécifique cherché.

TABLEAU DES POIDS SPÉCIFIQUES DES PRINCIPAUX CORPS SOLIDES A 0°.

Platine écroui	23,00	Marbre	2,84
Platine fondu	21,16	Aluminium	2,68
Or fondu	19,50	Quartz	2,66
Plomb	11,35	Verre ordinaire	2,50
Argent	10,47	Porcelaine	2,15
Cuivre en fil	8,88	Soufre	2,03
Laiton	8,39	Ivoire	1,92
Acier non écroui	7,82	Phosphore	1,77
Fer en barre	7,79	Sodium	0,96
Étain	7,29	Potassium	0,87
Fer fondu	7,21	Bois de hêtre	0,85
Zinc fondu	6,86	Bois d'orme	0,80
Antimoine fondu	6,71	Bois de sapin	0,66
Chrôme	5,90	Eau solide	0,93
Iode	4,95	Bois de peuplier	0,38
Sélénium cristallisé	4,80	Liége	0,24
Diamant	3,52		

POIDS SPÉCIFIQUES DES PRINCIPAUX LIQUIDES A 0°.

Mercure	13,598	Eau liquide à 0°	0,9998
Brôme	2,910	Huile d'olive	0,913
Acide sulfurique normal	1,854	Essence de térébenthine	0,868
— ordinaire	1,843	Alcool anhydre à 0°	0,8069
Acide nitrique concentré	1,520	Éther sulfurique	0,736
Sulfure de carbone	1,271		

CHAPITRE IV

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES GAZ SOUS L'ACTION DE LA PESANTEUR.

139. L'*expansibilité* et une grande *compressibilité* sont, avons-nous dit (13), les deux propriétés qui séparent nettement les gaz des liquides. Indiquons maintenant quel est le sens véritable de ces deux mots et quelles sont les expériences principales qui montrent bien que ces deux propriétés appartiennent aux corps gazeux.

140. **Expansibilité des gaz.** — Une masse gazeuse, abandonnée à elle-même dans un espace vide, augmente de volume jusqu'à ce qu'elle rencontre des parois résistantes qui l'empêchent de s'étendre davantage : elle

exerce contre ces parois une pression permanente, qui constitue ce qu'on a appelé la *force élastique des gaz*. Pour le prouver, on introduit une vessie à moitié pleine d'air et munie d'un robinet qu'on vient de fermer, sous une cloche de verre dans laquelle on enlève l'air à l'aide d'une machine pneumatique (*fig.* 81). Aussitôt que la raréfaction commence, on voit la vessie se gonfler d'elle-même, et l'air, qui n'occupait au début que la moitié de la capacité, la remplit bientôt tout entière en distendant les parois au point de les rompre, quand elles sont peu épaisses. Laisse-t-on rentrer l'air dans la cloche? La vessie s'affaisse et reprend son volume initial. Cette expérience est une preuve évidente de l'expansibilité de l'air. Avant qu'on ne fît le vide sous la cloche, la paroi de la vessie, également pressée par l'air qu'elle contenait et par l'air extérieur, demeurait immobile ; mais puisque la vessie se gonfle quand on enlève ce dernier, il faut admettre que la masse gazeuse interne, dès qu'elle ne rencontre plus la résistance qu'offrait tout à l'heure à son expansion l'air de la cloche, se dilate spontanément et chasse devant elle l'enveloppe extensible qui l'emprisonnait.



Fig. 81.

On explique de la même manière cette autre expérience, très-simple, qui consiste à placer sous le récipient de la machine pneumatique une bouteille qu'on a hermétiquement fermée avec un bouchon de liége enduit d'un corps gras, afin de diminuer le frottement. A peine a-t-on donné les premiers coups de piston pour raréfier l'air, qu'on voit la bouteille se déboucher d'elle-même, sans l'intervention apparente d'aucun agent mécanique. Au reste, les résultats que nous indiquons ici seraient exactement les mêmes si on substituait à l'air un gaz quelconque.

141. L'expérience semble cependant indiquer que cette expansibilité qui caractérise les gaz a une limite nécessaire ; et que, lorsque le fluide élastique atteint une raréfaction suffisamment grande, sa force expansive devient à peu près nulle. Indiquons, à ce propos, quelques résultats obtenus par Faraday. On sait que le mercure, même à dose très-faible, blanchit l'or en faisant avec lui un amalgame. Or, si à la température de 15°, on remplit, en partie, un flacon de verre avec du mercure, et qu'on ferme l'ouverture supérieure de ce flacon avec une feuille d'or qui se trouve ainsi placée à plus d'un centimètre de distance de la surface du liquide, on reconnait que l'or demeure intact, et que par suite la vapeur du mercure n'arrive point jusqu'à lui. Si, au contraire, la même feuille d'or est placée à moins d'un millimètre de distance du niveau du mercure, elle blanchit promptement. On serait donc conduit à penser que le mercure émet à la température de

15° une vapeur sensible, un gaz; mais ce fluide serait tellement rare que sa force expansive ne lui permettrait de s'élever qu'à une très-petite hauteur dans l'espace environnant. Quelques physiciens étaient déjà arrivés à cette idée, que les gaz ne gardent pas indéfiniment leur élasticité, en se fondant sur la limitation des atmosphères des planètes.


Fig. 82.

142. Grande compressibilité des gaz. — Le petit appareil nommé *briquet à air* (*fig.* 82) sert à montrer la grande diminution de volume qu'on peut faire subir à un gaz, en ne recourant cependant qu'à des actions mécaniques relativement assez faibles. Dans un corps de pompe en verre à parois très-épaisses, plein d'air et fermé à l'une de ses extrémités, peut se mouvoir un piston P muni d'une tige. En poussant celle-ci avec la main, on réduit aisément l'air à la moitié, au tiers de son volume primitif; et cela, sans exercer un grand effort. Aussitôt que la pression cesse, le piston se meut de lui-même en sens inverse, obéissant à la force de ressort du gaz jusqu'à ce que celui-ci ait repris son volume primitif. Cet instrument a été appelé *briquet à air*, parce qu'on l'emploie aussi pour rendre sensible le dégagement de chaleur qui a lieu au moment de la compression de ce fluide. Il suffit, à cet effet, de fixer un morceau d'amadou à la base supérieure du piston, et, en appuyant l'extrémité A de sa tige sur un support fixe, d'exercer une pression brusque avec la main sur la tête B du corps de pompe, pour voir une lueur apparaître et l'amadou prendre feu. La quantité de chaleur dégagée par la compression du fluide élastique est assez grande pour que l'inflammation de la matière combustible ait lieu au contact de l'oxygène de l'air. — Du reste, quand on répète la même expérience, sans introduire d'amadou, on aperçoit encore une lueur au moment de la compression; c'est le corps gras servant à imprégner le piston qui prend feu dans ce cas.

143. Pesanteur de l'air et des gaz. — C'est un fait remarquable, dans l'histoire de la science, qu'en présence de l'énergie des effets produits par l'air en mouvement : par les vents, par les ouragans qui déracinent les arbres, qui renversent les édifices, les anciens n'aient pas été conduits à admettre que l'air fût un corps pesant. C'est à Galilée qu'est due la première démonstration de cette propriété fondamentale des fluides élastiques. Un peu plus tard, Otto de Guericke, après avoir inventé la machine pneumatique, réalisa l'expérience que nous exécutons encore aujourd'hui, pour évaluer le poids d'un volume donné d'un gaz quelconque.

Un grand ballon de verre muni d'un robinet (*fig.* 83), et dans lequel on

a fait le vide, est suspendu à l'une des extrémités du fléau de la balance hydrostatique et équilibré par une tare placée dans le bassin qui est attaché à l'autre extrémité.

En ouvrant le robinet, on entend le sifflement de l'air qui rentre ; on voit aussitôt la balance s'incliner du côté du ballon et indiquer ainsi nettement un accroissement de poids dû à la rentrée du gaz. Une disposition bien simple permet d'ailleurs à l'air de pénétrer dans le ballon, quoique celui-ci demeure suspendu à la balance. Il suffit d'échancrer, suivant la ligne *a*, le filet de la vis à l'aide de laquelle on fixe au robinet la capsule C destinée à recevoir le poids. Aussitôt que R est ouvert, l'air passe par le petit canal *a* et entre dans le ballon. Quand on veut avoir le poids exact d'un volume de gaz égal au volume du ballon, il est nécessaire de prendre de nombreuses précautions, que nous indiquerons plus tard avec détail.

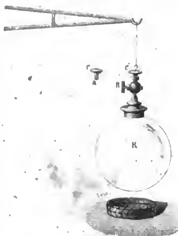


Fig. 83

144. Principe de Pascal appliqué aux gaz. — Les caractères distinctifs que nous avons assignés aux gaz, et que nous venons d'établir par l'expérience, n'empêchent pas le principe de Pascal de s'appliquer à ces corps tout aussi bien qu'aux liquides. C'est qu'en effet, le principe a sa raison d'être dans certaines propriétés résultant de la constitution moléculaire des corps, lesquelles sont précisément communes aux liquides et aux gaz : ainsi les molécules des gaz sont parfaitement mobiles, elles glissent sans frottement les unes sur les autres; leur équilibre est tout à fait indépendant de la forme qu'on donne à la masse considérée. Les pressions qui se transmettent dans les gaz ont, en outre, la même origine que dans le cas des liquides ; ce sont encore les actions mutuelles des particules, les actions mécaniques, la pesanteur qui représentent les forces intervenant dans la production de l'équilibre. Le principe de Pascal s'applique donc aux corps gazeux avec toutes les conséquences que nous avons développées dans le chapitre de l'Hydrostatique ; il n'y a de différence que pour les phénomènes qui dépendent de la présence d'une surface libre limitant la masse gazeuse, car la propriété d'expansibilité s'oppose évidemment à ce qu'une pareille surface existe, dans le cas des fluides aériformes.

145. *Les pressions exercées en un point quelconque d'une masse gazeuse en*

équilibre se transmettent dans tous les sens, avec la même intensité, sur des surfaces d'égale étendue. — Nous voyons ici disparaître une complication qui s'est offerte dans le cas des liquides. Tandis que l'action due à la pesanteur est variable avec la profondeur d'une manière très-sensible, quand il s'agit des liquides, on peut, au contraire, la regarder comme constante dans le cas d'une masse gazeuse renfermée dans un ballon, dans une cloche ou dans tout autre vase de capacité restreinte : la faible densité du fluide rend cette fois négligeable une variation de ce genre. Il suffit d'ailleurs de fixer, en différents points de la paroi d'un vase plein d'air, ces petits appareils formés de deux tubes communiquants qui servent à mesurer la force élastique des gaz et que nous étudierons plus tard sous le nom de *manomètres*. Le liquide contenu dans les deux branches des tubes ouverts qui forment ces manomètres se trouve, dans tous, soulevé à la même hauteur, aussitôt que, par un moyen mécanique quelconque, on exerce une pression sur l'air contenu dans le ballon.

146. Égalité de pression dans tous les points d'une même tranche de niveau. — En considérant les masses gazeuses d'un grand volume, l'atmosphère qui entoure notre globe, par exemple, nous retrouvons encore pour les gaz, le grand principe de l'égalité de pression en tous les points d'une même surface horizontale, principe que nous avons si souvent utilisé dans le chapitre précédent. Il suffira donc que l'air contenu dans une chambre communique librement, par une ouverture, avec l'air extérieur, pour que nous soyons en droit d'affirmer que la pression sur un élément plan quelconque de la masse gazeuse confinée est la même, quand l'équilibre existe, qu'à l'air libre, aux divers points du plan horizontal prolongé qui passe par le centre de l'élément.

Si toute communication de l'air confiné avec l'atmosphère extérieure vient à être supprimée, la pression ne changera pas dans l'intérieur de la chambre hermétiquement close, elle conservera désormais la même grandeur tant que la température sera constante ; car, les molécules gazeuses n'ayant éprouvé aucune variation dans leurs distances respectives, il n'y a aucune raison pour que la force élastique du gaz augmente ou diminue. On a ainsi le phénomène remarquable d'une atmosphère limitée présentant une faible masse et, par suite, un faible poids, qui produit, sur une surface donnée, la même pression qu'une colonne d'air dont la hauteur atteindrait les limites de l'atmosphère.

BAROMÈTRES.

147. Baromètre : son but. — On ne pouvait songer à déterminer *à priori*, comme en hydrostatique, la grandeur de la pression exercée par l'air atmosphérique, à un moment quelconque, contre les surfaces des corps solides et liquides qui y sont plongés. Il a fallu recourir à un procédé qui pour être indirect n'en est pas moins susceptible d'une grande

précision. Ce procédé consiste à évaluer quelle est la hauteur d'une colonne de mercure qui, reposant sur une surface donnée, produirait sur elle, par son poids, le même effet que la pression atmosphérique. Comme le poids spécifique du mercure est connu, on pourra estimer en kilogrammes la pression de cette colonne sur la surface en question. L'instrument de mesure fondé sur ce principe porte le nom de *baromètre*.

148. **Expériences de Torricelli et de Pascal.** — La réalisation de cette idée appartient à un élève de Galilée, à Torricelli. C'est en 1643 qu'a été faite, pour la première fois, par ce physicien, l'expérience célèbre qui a doté la science d'un de ses instruments les plus précis, le baromètre. Un tube de verre d'un mètre de longueur environ, fermé par un bout, ouvert à l'autre, fut d'abord complètement rempli de mercure, puis bouché avec le doigt et enfin renversé dans une cuvette A, en partie pleine du même liquide (*fig.* 84). Torricelli constata que la colonne mercurielle descendait d'abord et demeurait ensuite suspendue dans le tube à 28 pouces ($0^m,76$) de hauteur envi-

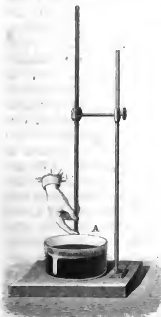
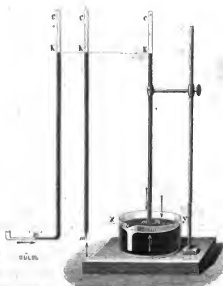


Fig. 84.


Fig. 85.

ron, aussitôt qu'on retirait le doigt qui bouchait l'ouverture. Comme, dans cette manière d'opérer, l'air extérieur n'avait pu pénétrer à mesure que le liquide descendait, le vide devait exister au-dessus du mercure en C (*fig.* 85), dans la portion du tube qu'on nomme *chambre barométrique*.

Torricelli se rendit un compte exact de la cause de cette suspension de la colonne mercurielle; malgré les idées fausses qui avaient cours dans la science, à cette époque, sur l'*horreur de la nature pour le vide*, il comprit que c'était la pression de l'air sur le mercure de la cuvette qui seule faisait équilibre au poids du liquide suspendu dans le tube. Mais il était réservé à Pascal de confirmer l'exactitude de cette explication. Pascal refit l'expérience de Torricelli en changeant la nature du liquide employé ; il se servit successivement d'eau, de vin, de liqueurs alcooliques, et il montra que les colonnes de liquide soulevées avaient une hauteur telle que leur pression équivalait à celle du mercure. Les longueurs des colonnes qui se maintenaient ainsi suspendues étaient sensiblement en raison inverse de leur densité. L'eau, par exemple, s'élevait à un peu moins de 32 pieds ($10^{m},33$). Pascal alla plus loin, ses idées théoriques le conduisirent à penser que le mercure devait baisser dans le tube de verre à mesure qu'on élèverait le baromètre au-dessus du sol. Des mesures barométriques effectuées, sur ces indications, à diverses stations, sur le Puy-de-Dôme, montrèrent en effet que la colonne mercurielle du tube de Torricelli avait une hauteur décroissante, à mesure qu'on s'élevait davantage dans l'atmosphère. Du pied de la montagne à son sommet, l'abaissement de la colonne fut de près de 3 pouces ($0^{m},08$). Cette fois l'influence de la pression de l'air était rendue évidente ; car, en gravissant la montagne, on diminuait la hauteur de la colonne atmosphérique qui reposait sur le mercure de la cuvette et l'on voyait, en même temps, ce liquide baisser à son tour dans le tube d'une manière constante. Cette expérience a été le point de départ d'une application très-importante du baromètre : la *mesure de la hauteur des montagnes*.

149. **Théorie du baromètre.** — Aujourd'hui, nos connaissances en hydrostatique, les preuves que nous avons de la pesanteur de l'air, permettent d'expliquer très-simplement l'expérience de Torricelli. Nous savons que, pour l'équilibre, tous les éléments d'égale étendue, situés dans la tranche horizontale XY correspondant à la surface libre (*fig.* 85), doivent supporter la même pression ; en m, qui fait partie de la surface libre, c'est l'atmosphère seule qui agit; en m', placé dans l'intérieur du tube et présentant la même surface, c'est la colonne mercurielle de base m' et de hauteur $m'K$. Puisqu'il y a équilibre, celle-ci doit contre-balancer, par son poids, la pression atmosphérique transmise par le liquide.

La vérité de cette conséquence théorique est rendue évidente par l'expérience suivante : qu'on prenne un tube barométrique de diamètre *étroit* à sa partie inférieure, et qu'on le coupe en m' pour l'isoler de la cuvette dans laquelle il était plongé, on verra le mercure se maintenir suspendu dans le tube comme précédemment, et alors il est soutenu, d'une manière incontestable, par la pression de l'atmosphère. Cette expérience ne réussirait pas avec un tube à large ouverture, parce que l'air extérieur, divisant

la colonne, gagnerait la chambre barométrique. On peut encore donner au tube la forme indiquée par la figure 85 : la pression de l'air s'exerce alors latéralement en m' ; mais sa grandeur n'est pas changée pour cela : la hauteur m'K demeure constante. La hauteur du mercure n'est d'ailleurs influencée, ni par la forme du tube, ni par son inclinaison plus ou moins grande sur l'horizon (103). La distance verticale des niveaux dans le tube et dans la cuvette demeure invariable tant que la pression exercée par l'air est constante. Si, en observant le baromètre à différentes époques, nous le voyons alternativement monter et descendre, nous devons en conclure que c'est la pression atmosphérique qui est soumise à des variations successives et que ces variations sont exactement mesurées par les déplacements de l'extrémité K de la colonne mercurielle.

150. **Évaluation numérique de la pression atmosphérique.** — Le problème que nous nous posions tout à l'heure, celui de l'évaluation en kilogrammes de la pression de l'atmosphère, est maintenant susceptible d'une solution très-simple. Le baromètre a-t-il aujourd'hui une hauteur de 76 centimètres ? cela veut dire que la pression de l'atmosphère, sur un centimètre carré de surface, est équivalente au poids d'une colonne de mercure dont le volume est de 76 centimètres cubes, c'est-à-dire à $1^k,033$. C'est là ce qu'on nomme habituellement *pression d'une atmosphère*. Quelquefois aussi, au lieu d'une évaluation en kilogrammes, on indique la pression d'un gaz par la hauteur de la colonne mercurielle qui lui est proportionnelle; la surface pressée est alors supposée constante. C'est dans ce sens qu'on dit : la pression de l'air est de 756 millimètres, de 740 millimètres, etc.

151. **Construction du baromètre.** — Nous construisons encore le baromètre comme le faisaient Torricelli et Pascal ; seulement nous prenons plus de précautions pour éliminer quelques causes d'erreur auxquelles ils n'obviaient qu'incomplétement. La condition essentielle pour qu'un baromètre soit bon, c'est que, dans la chambre barométrique, existe un vide complet. Or, à la surface intérieure des tubes de verre exposés à l'air adhèrent toujours de l'air et de l'humidité ; notre premier soin sera donc de les expulser, après l'introduction du mercure ; car, à la suite du renversement du tube dans la cuvette, ils se dégageraient à l'état de gaz ou de vapeur dans la chambre barométrique, et amèneraient une dépression anormale de la colonne mercurielle.

On prend un tube de verre d'une longueur de 85 à 90 centimètres et on lui donne la forme indiquée ci-contre (*fig.* 86) ; après l'avoir nettoyé avec l'acide nitrique étendu et l'eau *ordinaire*, on le dessèche avec soin, et on le remplit de mercure pur jusqu'à l'étranglement voisin de la boule. De nombreuses bulles gazeuses se montrent alors entre le mercure et la paroi ; on élimine les plus grosses en faisant courir une petite colonne d'air d'un bout à l'autre du tube. Puis, et c'est là l'opération importante, on

fait bouillir le mercure dans le tube, en commençant par la partie inférieure C, et propageant peu à peu l'ébullition, sans l'interrompre, de C vers la boule. La vapeur de mercure qui se forme et les oscillations de la colonne facilitent le dégagement de l'air et de la vapeur d'eau qui adhéraient aux parois et les entraînent jusqu'à la partie supérieure. La boule qu'on a soudée au tube, reçoit, pendant l'ébullition, l'excédant de mercure soulevé par la vapeur; en même temps, la pointe effilée empêche le renouvellement de l'air extérieur au contact du liquide chauffé et s'oppose ainsi à la formation d'oxyde de mercure qui, en se dissolvant dans le métal liquide, modifierait quelques-unes de ses propriétés physiques. L'ébullition de cette longue colonne mercurielle s'obtient sans danger en plaçant le tube au-dessus d'un fourneau rempli de charbons incandescents, lequel porte une échancrure en *e*. Le tube doit toujours être maintenu à distance des charbons, et on lui communique, avec les doigts, un mouvement de rotation continu, pour échauffer également ses différentes parties. Si, à la suite d'une ébullition bien dirigée, on reconnaît que le mercure présente une surface miroitante dans toute la longueur du tube, c'est que l'air a été complétement expulsé; sinon, l'ébullition doit être recommencée à partir de C, comme la première fois. Enfin, après le refroidissement du liquide, on sépare la boule du tube: on ferme exactement l'ouverture avec le doigt; on renverse l'instrument dans une cuvette en partie pleine de mercure purifié, et on le fixe contre une planchette de bois. Le baromètre étant ainsi construit, on peut s'assurer facilement qu'il ne reste aucun gaz dans la chambre C. Il suffit, à cet effet, d'incliner brusquement le tube pour que le mercure aille choquer la paroi supérieure; on entend un petit bruit sec quand le vide est complet. Au contraire, s'il reste un peu d'air, le choc du liquide contre le vase se trouvant amorti, le bruit est moins perceptible et comme étouffé.



Fig. 86.

152. **Baromètre normal.** — Veut-on un baromètre normal qui puisse fournir, à toute époque, des indications précises, et qui constitue un étalon auquel on comparera d'autres baromètres moins parfaits, pour juger de leur degré d'exactitude? Le tube de verre choisi T (*fig.* 87) doit avoir un diamètre intérieur de 2 centimètres et demi à 3 centimètres,

pour que la colonne mercurielle n'y subisse aucune dépression capillaire sensible. D'autre part, une vis à deux pointes *v*, mobile dans l'écrou *m*, fixé lui-même à la planchette, permet de régler, à chaque observation, par l'affleurement de la pointe inférieure, le niveau du mercure dans la cuvette. Alors, en prenant avec le cathétomètre la distance verticale de la pointe supérieure au niveau *a* du mercure dans le tube, et ajoutant la longueur constante qui sépare les deux pointes, on aura la hauteur barométrique avec toute l'exactitude désirable.

Il y aura encore à la corriger de l'influence de la température. Car on conçoit que lorsque le mercure s'échauffe, et par suite se dilate, sa densité diminue, et que, dès lors, à une même pression doit correspondre une hauteur absolue de la colonne liquide d'autant plus grande que cette température est plus élevée. On convient de ramener, dans tous les cas, la hauteur observée à ce qu'elle eût été, si le mercure avait été maintenu à la température de la glace fondante. Nous apprendrons plus tard à faire cette correction ; elle exige uniquement la connaissance de la température exacte du mercure. Cette température est fournie, dans le baromètre normal, par un thermomètre très-sensible *t*, qui plonge dans le mercure du tube D identique, pour le diamètre, la nature et la position, au tube barométrique employé. On est sûr, de cette façon, d'avoir la vraie température de la colonne mercurielle dans le baromètre.



Fig. 87.



Fig. 88.

153. Baromètre à cuvette ordinaire. — Avec les baromètres ordinaires destinés aux observations journalières, la hauteur de la colonne mercurielle, qui change notablement d'un jour à l'autre, quelquefois d'une heure à l'autre dans la même journée, s'estime beaucoup plus simplement. Le tube de verre T (*fig.* 88), d'un diamètre étroit et toujours rétréci par le bas, plonge dans une cuvette M très-large, afin que les variations de niveau du mercure demeurent insensibles. — Le zéro de l'échelle graduée placée le long du tube correspond ainsi à un niveau fixe ; il suffit alors, en se servant

du curseur V, qui peut glisser à la fois le long du tube et de l'échelle, de déterminer la division de cette échelle à laquelle correspond le niveau supérieur du mercure, pour avoir, par une simple lecture, la hauteur cherchée.

154. **Baromètre de Fortin.** — Malheureusement, un pareil instrument, bon pour les observations sédentaires, n'est nullement transportable en voyage, et comme le baromètre (nous l'expliquerons bientôt) offre un moyen très-commode et très-prompt de mesurer la hauteur des montagnes, il était important de construire un appareil qui, en conservant toute l'exactitude désirable, pût être facilement transporté, sans éprouver aucun dérangement. C'est à Fortin, célèbre mécanicien français, que nous devons la construction du baromètre à cuvette et à niveau constant qui remplit le mieux les conditions demandées. Nous décrirons ici le baromètre de Fortin, un peu modifié par M. Ernst, sous la direction de M. Delcros.



Fig. 89

1° *Cuvette.* — La cuvette est à fond mobile, afin que le niveau du mercure puisse y être maintenu constant. Ce fond mobile consiste en un fragment de peau de chamois solidement attaché au pourtour du cylindre de buis K (*fig.* 89). Il est soulevé ou abaissé, à la volonté de l'opérateur, par la vis V qui tourne dans un écrou fixe porté par l'étui de cuivre N. De cette façon, on peut toujours faire affleurer la surface du mercure dans la cuvette à l'extrémité de la pointe d'ivoire P implantée dans le couvercle de buis A'; extrémité qui correspond au zéro de l'échelle graduée placée le long de la colonne mercurielle dans le baromètre. Ainsi, la cuvette du baromètre de Fortin se compose, en définitive, du cylindre de verre C qui permet d'apercevoir la surface du mercure, des cylindres de buis A et K vissés l'un à l'autre, du fond mobile D et du couvercle A'; les brides *a*, *a'* servent à relier entre elles les garnitures métalliques qui enveloppent la partie supérieure et la partie inférieure de la cuvette. Enfin le tube barométrique pénètre dans la cuvette par la tubulure K'; il est maintenu dans le goulot de cette espèce de flacon par un disque de peau de chamois, attaché d'une part à l'étranglement E du tube, de l'autre au pourtour extérieur de la tubulure. Par ce moyen, le tube conserve une certaine mobilité, et l'air extérieur peut, en tamisant à travers la peau de chamois, venir exercer librement sa pression sur le mercure de la cuvette.

2° *Tube du baromètre.* — Le tube de verre du baromètre est protégé par un étui de cuivre qui l'enveloppe dans toute sa longueur. Ce dernier

est percé de deux fentes opposées, qui permettent d'apercevoir le niveau supérieur du mercure, dans toute l'étendue des déplacements que ce niveau doit subir. Sur le bord vertical de l'une des fentes, sont marquées les divisions en millimètres de l'échelle graduée. Un curseur annulaire D (*fig.* 90) peut glisser à la main, le long de la monture métallique (*) ; il a lui-même deux fenêtres rectangulaires opposées, l'une antérieure, l'autre postérieure. Sur l'une des arêtes verticales de la fenêtre antérieure est tracé un vernier dont la division 20 correspond au bord supérieur *m* de cette fenêtre. Ce bord est échancré, afin que l'œil, apercevant le côté horizontal de la fenêtre postérieure, puisse toujours maintenir le rayon visuel dans le plan de ces deux bords rectilignes. L'observateur peut alors rendre sans difficulté, par le glissement du curseur, ce plan tangent à la surface convexe offerte par le mercure. Il suffit de noter la position du point 20 du vernier sur l'échelle graduée, et de lire le numéro de la division coïncidente, pour avoir, à $\frac{1}{20}$ de millimètre près, la hauteur barométrique cherchée. Enfin, un thermomètre à mercure dont le réservoir est enveloppé par un tube de cuivre est fixé à la monture métallique; il donne la température de la colonne mercurielle et permet d'effectuer la correction dont nous avons déjà parlé.

Fig. 90.

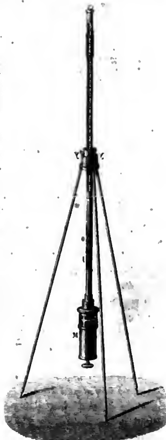


Fig. 91.

155. **Emploi de l'instrument.** — Le baromètre est porté (*fig.* 91) par

(*) Dans quelques appareils, le mouvement du curseur est produit à l'aide d'une crémaillère entaillée sur un bord vertical de la fenêtre antérieure de l'étui en cuivre. Cette disposition offre plus d'inconvenients que d'avantages. Il est beaucoup plus facile de mettre au point en opérant comme suit : on amène le curseur, par glissement, à peu près dans la position voulue; puis avec quelques légers coups de crayon, donnés sur le bouton, on le fait arriver aisément à sa position finale.

un trépied de cuivre muni d'une suspension à la Cardan. Cette suspension consiste en deux anneaux concentriques, l'un extérieur fixe, l'autre intérieur mobile autour d'un axe horizontal XX' (*fig.* 92). Ce dernier anneau porte deux vis Y,Y', situées sur le prolongement l'une de l'autre, et, autour de ce nouvel axe de rotation perpendiculaire au premier, peut tourner le baromètre.

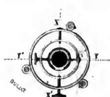


Fig. 92.

Dans ces conditions, l'instrument prend librement toutes les positions et se place de manière à ce que son axe de figure soit toujours vertical. La cuvette étant assez lourde, le centre de gravité se trouve situé très-bas, et par suite l'équilibre est parfaitement stable.

Le baromètre, ainsi suspendu, on se sert de la vis V (*fig.* 89) pour faire affleurer la surface du mercure, dans la cuvette, à l'extrémité de la pointe d'ivoire. On arrive aisément à établir ce contact, sans pénétration de la pointe dans le mercure; car l'image de la pointe doit faire suite à la pointe elle-même quand le contact existe; s'il y a pénétration, le mercure se déprime autour de P, et le jeu de la lumière à la surface du liquide en avertit l'opérateur. Ce premier résultat obtenu, on est sûr que le niveau du mercure dans la cuvette correspond exactement au zéro de l'échelle. On amène ensuite, comme il a été dit plus haut (154), la ligne *m* du curseur sur le plan tangent horizontal à la surface convexe du mercure, et sa position sur l'échelle graduée donne la hauteur demandée. L'observation étant terminée, on remonte la vis V pour soulever le fond mobile de manière à remplir complétement de mercure et le tube et la cuvette. On peut alors impunément renverser le baromètre, l'introduire dans un étui de bois doublé de cuir et le transporter à de grandes distances; car le mercure qui remplit l'instrument représente comme une barre solide qu'on aurait rendue tout à fait immobile. Si, dans le voyage, un dérangement quelconque introduit de l'air dans l'appareil, cet air va se loger au point le plus haut dans la cuvette, et il ne saurait en pénétrer la moindre bulle dans le tube.

156. **Correction provenant de la capillarité.** — Quand on compare les indications d'un bon baromètre de Fortin à celles du baromètre normal placé dans les mêmes conditions, on trouve un désaccord qui, dans quelques circonstances, va jusqu'à plus d'un millimètre. Cela tient à ce que, dans le baromètre de Fortin, le diamètre du tube étant toujours assez petit, l'action capillaire exercée au contact du mercure et des parois vitreuses détermine une dépression sensible de la colonne liquide. Cette dépression dépend à la fois et de la courbure de la surface mercurielle et du diamètre du tube. La valeur de ce dernier est fournie par les constructeurs. Quant à l'autre quantité, on l'obtient en mesurant chaque fois, à l'aide du

curseur déjà décrit, la distance f des plans horizontaux correspondant au sommet et à la base du ménisque M (*fig.* 93), distance qu'on appelle la *flèche du ménisque*. On possède alors les deux éléments de la correction qu'on trouve toute calculée, dans une table à double entrée, déduite par M. Delcros des formules de M. Schleiermacher. La première colonne horizontale de cette table renferme les diverses flèches du ménisque variant par $\frac{1}{10}$ de millimètre ; la première colonne verticale contient les différents diamètres de tubes variant de $\frac{2}{10}$ en $\frac{2}{10}$ de millimètre. Il suffit donc de choisir, dans chacune de ces deux colonnes, les nombres mêmes que l'observation de l'échelle graduée a fournis, et au point de rencontre de la ligne horizontale et de la ligne verticale qui aboutissent à ces nombres, se trouve, comme dans une table de Pythagore, la correction cherchée, qui est toujours additive. Donnons un exemple de cette correction : la hauteur barométrique brute observée dans un baromètre étant 759^{mm},272, on fait descendre la ligne *m* du curseur, depuis le plan tangent au sommet du ménisque jusqu'au plan passant par sa base ; le point 20 du vernier marche de 1^{mm},2, la flèche était donc de 1^{mm},2. D'autre part, le rayon intérieur du tube était de 4^{mm}. Pour effectuer la correction, on cherche dans la première colonne horizontale de la table dont nous avons transcrit ici une portion, 1^{mm},2 ; dans la première colonne verticale, 4^{mm} ; on trouve au point de concours des lignes correspondantes 0^{mm},635 ; donc la hauteur barométrique vraie est égale à 759,272 + 0,635 = 759^{mm},907.



Fig. 93.

TABLEAU.

EXTRAIT DE LA TABLE DE LA DÉPRESSION DE LA COLONNE BAROMÉTRIQUE DUE A L'ACTION DE LA CAPILLARITÉ.

RAYON DU TUBE en millimetr.	HAUTEUR DE LA FLÈCHE DU MÉNISQUE EN MILLIMÈTRES.																
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
2,0	0,302	0,598	0,885	1,158	1,413	1,648	1,859	2,046	2,209	2,348	»	»	»	»	»	»	»
2,2	0,245	0,487	0,723	0,948	1,101	1,300	1,541	1,705	1,851	1,978	2,087	»	»	»	»	»	»
2,4	0,203	0,403	0,599	0,787	0,966	1,135	1,292	1,436	1,565	1,080	1,780	1,866	»	»	»	»	»
2,6	0,170	0,337	0,502	0,661	0,813	0,958	1,093	1,218	1,332	1,436	1,528	1,608	1,670	»	»	»	»
2,8	0,143	0,285	0,425	0,560	0,691	0,815	0,932	1,041	1,142	1,235	1,318	1,392	1,456	1,511	»	»	»
3,0	0,122	0,243	0,362	0,478	0,591	0,698	0,800	0,896	0,985	1,068	1,143	1,210	1,270	1,32?	1,368	»	»
3,2	0,103	0,209	0,312	0,412	0,509	0,602	0,691	0,776	0,855	0,928	0,995	1,057	1,112	1,101	1,203	1,238	»
3,4	0,091	0,181	0,209	0,350	0,441	0,523	0,601	0,675	0,745	0,810	0,871	0,926	0,970	1,021	1,061	1,093	»
3,6	0,079	0,157	0,234	0,310	0,384	0,455	0,524	0,590	0,652	0,710	0,764	0,814	0,860	0,901	0,938	0,970	»
3,8	0,069	0,137	0,205	0,271	0,330	0,399	0,459	0,517	0,572	0,624	0,073	0,718	0,760	0,797	0,8 1	0,861	0,887
4,0	0,060	0,120	0,180	0,238	0,295	0,350	0,404	0,455	0,504	0,551	0,594	0,635	0,073	0,707	0,738	0,766	0,790
4,2	0,053	0,106	0,158	0,210	0,260	0,309	0,356	0,402	0,446	0,487	0,526	0,563	0,597	0,028	0,657	0,682	0,705
4,4	0,047	0,094	0,140	0,185	0,230	0,273	0,315	0,356	0,395	0,432	0,407	0,500	0,531	0,559	0 585	0,609	0,630
4,6	0,047	0,083	0,124	0,164	0,204	0,242	0,280	0,316	0,351	0,384	0,416	0,445	0,473	0,499	0,522	0,544	0,563

157. **Baromètre de Gay-Lussac.** — On a tâché de construire un baromètre ayant une masse moindre que celui de Fortin, et par suite d'un transport encore plus facile. Gay-Lussac a atteint le but en donnant à l'instrument la forme d'un siphon renversé (*fig.* 94), dont la grande branche est fermée et la petite ouverte. Dans la région où doivent arriver les niveaux du mercure, les deux branches A et B sont formées par deux fragments d'un même tube, afin qu'elles aient exactement le même diamètre; elles communiquent entre elles par un tube de diamètre beaucoup plus étroit, afin de rendre difficile la pénétration de l'air dans la chambre barométrique, lorsqu'on imprimera accidentellement des secousses à l'instrument. L'air extérieur exerce sa pression sur le mercure de la petite branche par un orifice très-étroit O placé au sommet d'un petit entonnoir rentrant. De cette façon, l'air pénètre en B, mais le mercure ne peut pas sortir, lorsqu'on renverse le baromètre. Sur la monture métallique qui enveloppe le tube de verre sont tracées deux échelles dont le point de départ commun ou le zéro est placé vers le milieu de la longueur du siphon. On est obligé de déterminer successivement les distances, à ce zéro, des deux niveaux du mercure, et la somme des deux distances donne la hauteur barométrique.

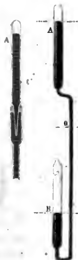


Fig. 95. Fig. 94.

Bunten a perfectionné le baromètre de Gay-Lussac, en terminant la grande branche du siphon, par une pointe effilée qui pénètre dans la partie supérieure élargie du tube de jonction (*fig.* 95). De cette manière, si une bulle d'air pénètre dans le baromètre, en divisant la colonne mercurielle, elle va se loger dans la partie annulaire comprise entre la pointe et la paroi du tube et n'arrive pas dans la chambre barométrique.

On espérait que, par le fait de l'égalité du diamètre des deux branches du siphon, les dépressions capillaires se compenseraient; et qu'alors toute correction se rapportant à la capillarité deviendrait inutile; il n'en est rien. La surface du mercure dans la petite branche est en présence de l'air, tandis que celle qui correspond à la grande est placée dans le vide. Il en résulte une différence sensible dans les actions exercées par les parois du tube; car, dans l'une des branches, le liquide est en contact avec une paroi vitreuse, recouverte d'une mince couche d'air, tandis que, dans l'autre, c'est la surface du verre débarrassée de tout corps étranger qui touche le mercure. On comprend que l'action capillaire puisse être très-différente dans ces deux circonstances. D'un autre côté, la première surface se recouvre, avec le temps, de poussières apportées par l'air, qui modifient peu à peu l'effet dû à la capillarité et rendent toute correction incertaine. Aussi,

comme instrument de précision, le baromètre de Gay-Lussac est-il inférieur à celui de Fortin.

158. Baromètre à cadran. — Le baromètre à cadran est un baromètre à siphon dans lequel les variations de hauteur de la colonne mercurielle sont accusées par le mouvement d'une aiguille sur un cadran divisé (*fig.* 96). Un flotteur en fer, porté par le mercure de la branche ouverte, est suspendu à un cordon de soie qui, après s'être enroulé sur une poulie, est tendu par un contre-poids un peu moins pesant que le flotteur. L'axe de la poulie est fixé à une aiguille et l'entraîne dans son mouvement. Habituellement, le tube barométrique est caché par la monture de l'instrument, et l'on n'aperçoit que le cadran sur lequel se meut l'aiguille. On voit de suite que, si la pression atmosphérique augmente, le flotteur descend et l'aiguille tourne dans un sens; si elle diminue, l'aiguille tourne en sens inverse. On peut donc tracer à l'avance, sur le cadran, les divisions qui correspondent aux diverses hauteurs absolues de la colonne de mercure. Quant aux autres indications : pluie, variable, beau temps, etc., qui sont inscrites sur le cadran, nous verrons au chapitre de la Météorologie quelle est l'importance qu'il faut leur attribuer.

Fig. 96.

159. Baromètre métallique de Bourdon. — Le baromètre métallique de Bourdon est fondé sur l'élasticité du laiton. Un tube aplati T, en laiton, dont la section est figurée en M (*fig.* 97), à parois minces, est contourné en cercle et fixé en son milieu F. A chacune de ses extrémités, il s'articule avec des bielles *b*,*b'* qui impriment un mouvement de rotation autour de l'axe O à un secteur denté S entraînant dans son mouvement une aiguille qui se meut sur un cadran divisé. Le tube est vide d'air et hermétiquement clos. Dans ces conditions, la pression de l'atmosphère augmente-t-elle? le tube s'aplatit davantage, sa courbure augmente, ses deux extrémités se rapprochent, et l'aiguille marche de gauche à droite. La pression diminue-t-elle ? le tube, en vertu de l'élasticité du métal qui le forme, tend à




M

Fig. 97.

reprendre sa forme première, et l'aiguille marche en sens contraire. En graduant l'instrument par comparaison avec un autre baromètre, on a à sa disposition un appareil peu volumineux, nullement fragile et qui n'a d'autre inconvénient, pour donner la mesure de la pression atmosphérique avec précision, que d'éprouver à la longue une modification sensible dans l'état moléculaire du tube T, modification qui rend nécessaire, de temps à autre, une révision de la graduation.

160. **Mesure des hauteurs par le baromètre.** — L'un des usages les plus importants du baromètre est la mesure des hauteurs. Le principe théorique servant de point de départ à cette application est des plus simples. Supposons que la colonne atmosphérique dont on veut estimer la hauteur soit formée d'air sec à la température de la glace fondante et que cet air ait partout la même densité qu'à la surface de la mer, au point où la pression est de $0^m,76$. Dans ces conditions, l'air pèse, à volume égal, 10 515 fois moins que le mercure. Ainsi, lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, chaque millimètre d'abaissement du mercure dans le baromètre indique qu'on laisse, au-dessous de soi, une colonne d'air 10515 fois plus haute, c'est-à-dire qu'on est monté de $10^m,515$. Rien ne serait donc plus facile que de déduire de la variation de hauteur de la colonne mercurielle accusée par le baromètre, les distances verticales des stations où cet instrument aurait été observé. Mais les choses sont loin de se passer aussi simplement que nous l'indiquons là. D'abord, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, la densité de l'air diminue d'une manière continue; cela doit être, puisque la pression supportée par chaque tranche se trouve diminuée du poids de celles qu'on abandonne au-dessous de soi. On arrive même par le calcul à ce résultat : que si la colonne atmosphérique avait, en tous ses points, la même température et n'était point sillonnée par des courants, *les densités des couches d'air décroîtraient en progression géométrique pour des hauteurs croissant comme les termes d'une progression arithmétique.* — En second lieu, la température, l'état hygrométrique changent à mesure qu'on s'élève. — On obtiendrait des résultats très-éloignés de la vérité, en opérant comme nous venons de le dire.

161. **Formule de Laplace.** — Laplace, en tenant compte de ces diverses circonstances, a calculé, pour effectuer la mesure qui nous occupe, la formule suivante :

$$X = 18\,393^m \log \frac{H}{h} \left(1 + \frac{2(t + t')}{1000}\right) (1 + 0{,}002837 \cos 2\lambda)$$

dans laquelle X représente la distance des deux stations, H et h les hauteurs barométriques ramenées à 0° qui y ont été observées, t et t' les températures de l'air dans les deux circonstances et enfin λ la latitude du lieu où l'on opère. Le calcul de cette formule se trouve considérablement sim-

plifié, en se servant des tables calculées, à cet effet, par Oltmanns et qu'on trouve dans l'Annuaire du Bureau des longitudes. On cherche, dans la première table, le nombre correspondant à la hauteur brute du baromètre pour la station inférieure; soit a ce nombre. On cherche de même celui qui correspond à la hauteur brute observée à la station supérieure, désignons-le par b; et enfin soit c le nombre, ordinairement très-petit, qui dans la deuxième table est en face de $T - T'$, T et T' étant les températures du mercure dans le baromètre, au moment de chaque observation. La valeur de X approchée est $a - b - c$. Si $T - T'$ était négatif, la valeur de X serait $a - b + c$. On effectue alors le produit $(a - b \pm c)\,\frac{2(t+t')}{1000}$. Enfin, la correction tenant à la latitude s'obtient, en consultant une troisième table; elle est fournie par le nombre qui correspond verticalement à la latitude du lieu et horizontalement à la hauteur approchée qu'on vient de calculer. Cette correction est toujours additive. Pour $\lambda = 45°$ le facteur contenant la latitude est 1; par conséquent, pour des lieux dont la latitude est peu différente de 45°, la troisième correction est négligeable. — Il faut, quand on se sert du baromètre pour la mesure des hauteurs, choisir, pour effectuer les opérations, les journées calmes où le vent ne souffle pas avec violence; car la formule de Laplace suppose, qu'entre les deux stations, la colonne atmosphérique est immobile. L'heure de midi paraît être la plus favorable à ce genre d'observation.

Formule de M. Babinet. — M. Babinet a proposé, dans le même but, une formule plus simple que celle de Laplace en ce qu'elle ne contient aucun logarithme. Elle donne des résultats très-exacts lorsqu'il s'agit de mesurer des hauteurs qui ne dépassent pas 1000 mètres.

Voici cette formule :

$$X = 16000^{m}\,\frac{H-h}{H+h}\left(1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right).$$

162. **Hauteur de l'atmosphère.** — Si la constitution de l'atmosphère que Laplace a admise, pour le calcul de sa formule, se maintenait, quelle que fût la hauteur, on aurait aisément une limite approchée de la hauteur de la colonne d'air placée au-dessus de nos têtes, en faisant dans la formule $H = 760$ millimètres, et en donnant à h une valeur très-faible : une fraction de millimètre, par exemple. On trouve alors pour X une valeur de 48 à 50 kilomètres. Mais l'hypothèse que l'on fait ainsi est certainement très-éloignée de la vérité; car, en se fondant sur l'observation de phénomènes d'un ordre tout différent, on est conduit à admettre pour l'atmosphère une hauteur beaucoup plus grande. Dans l'état actuel de la science, la question est loin d'être élucidée.

CHAPITRE V

COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

I. — LOI DE MARIOTTE

163. La force élastique d'un gaz ne dépend que de son volume et de sa température. Laissons d'abord ce dernier élément constant et cherchons quelle est la relation qui lie la force élastique d'un gaz à son volume. Boyle et Mariotte ont les premiers formulé et démontré par l'expérience la loi très-simple qui unit ces deux quantités; on la nomme en France, loi de Mariotte. En voici l'énoncé: *Les volumes occupés par une même masse gazeuse, dont la température demeure constante, sont en raison inverse des pressions qu'elle supporte.*



Fig 98.

164. **Démonstration expérimentale pour les pressions supérieures à une atmosphère.** — Pour démontrer la loi de Mariotte dans le cas de pressions plus grandes que la pression atmosphérique, on se sert d'un long tube en verre (*fig.* 98) fixé contre une planchette en bois et auquel on a donné la forme d'un siphon renversé à branches inégales. La petite branche B est fermée, la grande branche A est ouverte à sa partie supérieure. Deux échelles graduées ayant leur zéro au même point sont tracées sur la planchette, parallèlement à l'axe de chaque portion du tube. La petite branche est divisée en parties d'égale capacité. Si elle est choisie cylindrique (condition à peu près réalisée dans les appareils de cours), les divisions d'égale longueur correspondent à des capacités égales.

On commence par introduire une petite quantité de mercure dans la courbure C, et on arrive, par tâtonnement, en inclinant l'appareil de droite et de gauche, à faire sortir quelques bulles d'air de B dans l'atmosphère et à réaliser cette condition : que les deux niveaux du mercure soient sur un même plan horizontal qui corresponde au zéro commun de la graduation. A ce moment, se trouve en B, une masse gazeuse qui est isolée de l'air ambiant et qui supporte la pression d'une atmosphère, puisque

les deux colonnes de mercure, placées au-dessous du zéro, s'équilibrent mutuellement et qu'elles transmettent, au gaz confiné, la pression de l'air extérieur. Soit 24, le nombre de divisions qu'elle occupe.

Si, maintenant, on verse par l'ouverture A une certaine quantité de mercure, le volume de l'air contenu dans B diminue. Quand il est réduit à la moitié de ce qu'il était d'abord, c'est-à-dire à ne plus occuper que 12 divisions, on constate que la distance des deux niveaux dans les deux branches du tube de Mariotte est égale à la hauteur barométrique au moment de l'expérience. Cette hauteur est-elle de 758 millimètres? on trouve que le niveau du mercure dans le tube B affleure à 770 ou 758 + 12. Donc, quand l'air est réduit à la moitié de son volume, il supporte une pression égale à la pression extérieure que transmet le liquide, augmentée du poids d'une colonne de mercure représentant elle-même une atmosphère ; en tout 2 atmosphères. De même, en introduisant, de nouveau, assez de mercure, par la branche ouverte, pour que le volume de l'air soit réduit au $\frac{1}{3}$ ou à 8 divisions, on reconnait que le niveau dans la grande branche atteint 1532 millimètres au-dessus du zéro ou 1516 millimètres (2 fois 758) au-dessus du niveau actuel dans la branche A ; donc la pression supportée par l'air est devenue cette fois égale à 3 atmosphères. En résumé on a :

Volume initial..	$24 = 1 \times 24$	....	Pression initiale.	758mm	$= 1 \times 758$
2e volume......	$12 = \frac{1}{2}$ de 24	....	2e pression......	1516	$= 2 \times 758$
3e volume......	$8 = \frac{1}{3}$ de 24	....	3e pression.....	2274	$= 3 \times 758$

Ainsi, quand les volumes d'une même masse gazeuse varient comme les nombres $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$, les pressions correspondantes sont représentées par 1, 2, 3. La loi de Mariotte se trouve donc parfaitement vérifiée. Une précaution qu'il ne faut pas négliger, si l'on veut une grande précision, c'est, après avoir comprimé l'air, d'attendre quelques instants avant d'observer les niveaux, pour que la chaleur dégagée par la compression ait pu se disséminer dans l'espace environnant. Sans cela, la température du gaz comprimé s'élevant, sa force élastique augmente et les mesures observées ne s'accordent plus avec la loi.

Comme, à l'époque où la masse gazeuse est en équilibre, la force élastique qu'elle possède est toujours égale à la pression qu'elle supporte, nous serons en droit, dans les développements qui vont suivre, d'employer indifféremment l'un pour l'autre les mots : *tension* ou *force élastique* du gaz, et *pression* par lui supportée.

165. Vérification de la loi de Mariotte pour les pressions infé-

rieures à une atmosphère. — On se sert, à cet effet, d'une cuvette profonde, en partie pleine de mercure (*fig.* 99), dans laquelle plonge un tube barométrique bien cylindrique qui est gradué en volumes égaux et qui contient de l'air à sa partie supérieure AB.



Fig. 99.

Première expérience. — Le tube est enfoncé dans la cuvette jusqu'à ce que le niveau intérieur du mercure soit sur le même plan que le niveau extérieur. A ce moment, l'air occupe le volume 10 et sa pression égale la pression atmosphérique, 758 millimètres.

Deuxième expérience. — Le tube est soulevé jusqu'à ce que l'air ait acquis le volume 20. On constate que la colonne mercurielle demeure suspendue à une hauteur de 379 millimètres $= \frac{1}{2}$ 758 millimètres. Or, dans cet état d'équilibre, la pression supportée par un élément plan choisi dans le mercure du tube sur le prolongement du niveau extérieur, doit toujours être égale à une atmosphère, et, comme la colonne liquide soulevée représente déjà, par son poids, $\frac{1}{2}$ atmosphère, il faut que la force élastique de l'air contenu dans le tube représente l'autre $\frac{1}{2}$ atmosphère. Ainsi, quand le volume est 2, la pression correspondante est $\frac{1}{2}$.

Troisième expérience. — On soulève le tube jusqu'à ce que le volume de l'air devienne 30, le triple du volume initial; on trouve le mercure suspendu à $505^{mm},4 = \frac{2}{3}$ de 758. La force élastique de l'air est égale cette fois à $758 - 505,4 = 252,7 = \frac{1}{3}$ de 758. Ainsi, quand le volume devient 3, la pression correspondante est $\frac{1}{3}$. La loi de Mariotte est vérifiée.

166. **Autre forme de la loi de Mariotte.** — On peut donner à la loi de Mariotte une autre forme qui rend plus directe la solution de quelques problèmes. Lorsque le volume d'un gaz, qui était primitivement 1, se trouve réduit à $\frac{1}{2}$, la même masse étant contenue dans un espace moitié moindre, sa densité est devenue double. Quand le volume du gaz est réduit au $\frac{1}{3}$ de ce qu'il était d'abord, la densité est rendue triple, etc. De là cet autre énoncé : *Les densités d'un gaz sont proportionnelles aux pressions qu'il supporte, la température demeurant constante.*

167. Jusqu'ici, il n'a été question de la vérification de la loi de Mariotte que pour l'air atmosphérique ; et l'on voit que, dans les précédents appareils, où la pression a varié de 3 atmosphères à $\frac{1}{3}$ atmosphère, les résultats de l'expérience s'accordent bien avec l'énoncé de la loi. En sera-t-il de même pour les gaz autres que l'air et pour l'air lui-même, quand on le soumettra à des pressions beaucoup plus considérables ? Ce sont là deux questions importantes que nous allons actuellement étudier.

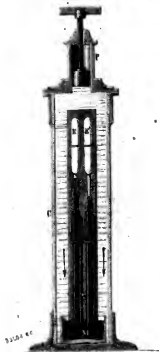


Fig. 100.

168. **Inégale compressibilité des gaz. Expériences de M. Despretz.** — M. Despretz a, le premier, établi, par des expériences très-concluantes, l'inégale compressibilité des fluides aériformes. Son procédé très-simple a permis de comparer entre eux, au point de vue de la loi de Mariotte, l'air atmosphérique et les gaz acide sulfureux, acide sulfhydrique, ammoniac et cyanogène. Deux éprouvettes graduées E', E d'égal diamètre (*fig.* 100) remplies, l'une d'air sec, l'autre d'acide sulfureux sec, ont leurs ouvertures inférieures plongées dans un même réservoir M, en partie plein de mercure. Tout ce système est introduit et maintenu dans un cylindre en verre, à parois épaisses, rempli d'eau et surmonté d'un corps de pompe P dans lequel peut descendre un piston. Le volume initial, la pression initiale sont identiques pour les deux gaz, et leur température ne peut changer à cause de la grande masse d'eau qui les entoure. Dans ces conditions, on comprime l'eau à l'aide du piston :

cette pression se transmet au mercure qui monte, à la fois, dans les deux éprouvettes et diminue le volume de chacun des gaz. Si les deux gaz employés étaient également compressibles, le mercure devrait s'élever à la même hauteur dans les deux cloches ; mais les choses se passent autrement : à partir de 2 atmosphères, l'écart est déjà très-sensible ; l'acide sulfureux se comprime plus que l'air ; l'acide sulfhydrique, le cyanogène, le gaz ammoniac, et en général les gaz liquéfiables, présentent des variations très-notables, dans le même sens. Pour augmenter la sensibilité de son appareil, M. Despretz intercalait vers le premier tiers de la longueur, à la partie supérieure de chaque éprouvette, des tubes T et T' d'un diamètre étroit. Alors, en exerçant une pression suffisante pour que les niveaux du mercure aboutissent à ces tubes, on pouvait estimer le volume final de chaque masse gazeuse avec beaucoup plus de précision.

169. **Expériences de Dulong et Arago.** — Dulong et Arago, dans le but de mesurer la force élastique de la vapeur d'eau, à de hautes températures, eurent recours à l'air comprimé. Ils furent dès lors conduits à éprouver, au préalable, la loi de Mariotte, dans le cas de pressions considérables : ils ont poussé leurs expériences jusqu'à 27 atmosphères.

Leur méthode n'est, au fond, que celle de Mariotte décrite plus haut (164). Seulement, au lieu de verser, par l'extrémité ouverte de la grande branche de l'appareil, le mercure destiné à comprimer l'air et à donner la mesure de sa force élastique, Dulong et Arago se servaient d'une pompe foulante, pour obliger ce liquide à s'élever d'un réservoir où il était primitivement renfermé, à la fois, dans la branche fermée contenant le gaz et dans la branche ouverte communiquant avec l'atmosphère. Il était donc facile d'évaluer, à toutes les époques, le volume occupé par la masse gazeuse et la pression correspondante qu'elle subissait. Ces habiles expérimentateurs conclurent de leurs essais, que la loi en question peut être admise pour l'air jusqu'à 27 atmosphères. La différence entre les nombres fournis par l'expérience directe et ceux qu'indique la loi était toujours moindre que $\frac{1}{100}$ de leur valeur moyenne ; et elle n'allait pas d'ailleurs en croissant, à mesure que la pression totale éprouvée par le gaz était rendue plus grande.

170. Les travaux de Dulong et Arago semblaient donc trancher définitivement la question, au moins pour ce qui concerne l'air atmosphérique. Cependant, des résultats d'expérience obtenus plus tard par M. Regnault dans l'étude de la dilatation de l'air soumis à diverses pressions, parurent tout à fait inconciliables avec cette idée, que la loi de Mariotte s'applique rigoureusement à ce fluide élastique. D'un autre côté, la méthode suivie par Dulong et Arago pouvait être soumise à de justes critiques : leur appareil présentait, pour les mesures effectuées, une sensibilité dé-

croissante, à mesure que la pression allait en augmentant. Au début, le volume de l'air variait de 1 à $\frac{1}{2}$ dans un tube de 1m,70 de longueur, lorsqu'on passait d'une atmosphère à deux atmosphères. Un peu plus tard, pour le même changement dans la pression, le volume variait de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{6}$ du volume initial, de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{11}$; ainsi, pour les fortes pressions, le changement de hauteur du mercure dans le tube fermé devenait de plus en plus faible, tandis que la variation de la pression demeurait constante. L'erreur absolue dans l'estimation du volume de la masse gazeuse était, sans doute, la même à toutes les époques, mais l'erreur relative croissait avec la pression.

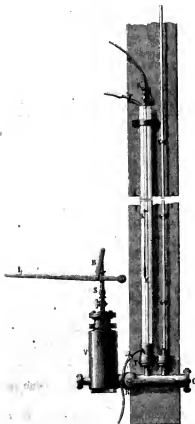


Fig. 101. — Appareil de M. Regnault pour la vérification de la loi de Mariotte (*).

171. **Méthode de M. Regnault. Principe.** — M. Regnault a soumis la loi de Mariotte à une vérification nouvelle, en se servant d'un appareil qui ressemble beaucoup, par sa construction, à celui de Dulong et Arago, mais qui en diffère essentiellement par le principe : « Un tube de verre M d'un diamètre intérieur de 8 à 10 millimètres et de 3 mètres de longueur, est placé dans une position verticale (*fig.* 101). Ce tube fermé à son extrémité supérieure par un robinet R', communique, par la partie inférieure, avec un second tube vertical M' très-long, destiné à contenir la colonne de mercure qui pressera l'air renfermé dans le premier tube. Sur ce premier tube, on a tracé deux repères : l'un, vers l'extrémité inférieure, correspond au volume 1; le second repère correspond exactement à la moitié de la capacité du tube

(*) V réservoir en partie plein de mercure. — S pompe à eau. — L levier pour manœuvrer la pompe. — M tube contenant le gaz confiné. — M' manomètre à air libre. — K manchon entourant le manomètre à air comprimé. — R robinet établissant la communication entre le réservoir V et les manomètres. — R' robinet établissant la communication entre M et un réservoir de gaz comprimé.

depuis son extrémité supérieure jusqu'au haut du repère inférieur, et indique, par conséquent, le volume $\frac{1}{2}$.

« On remplit le volume 1 d'air sec sous la pression d'une atmosphère ; puis, on refoule cet air, en faisant monter le mercure, de manière à lui faire occuper le volume $\frac{1}{2}$. Si la loi de Mariotte est rigoureusement exacte, on doit trouver que la force élastique du gaz est devenue égale à 2 atmosphères.

« On remplit exactement le volume 1 d'air sous la pression de 2 atmosphères, et on le refoule dans le volume $\frac{1}{2}$; sa force élastique doit être égale à 4 atmosphères. En remplissant le volume 1 d'air sous la pression de 4 atmosphères et refoulant cet air dans le volume $\frac{1}{2}$, on devrait obtenir une force élastique de 8 atmosphères, et ainsi de suite. De cette façon, les volumes occupés par le gaz sont toujours très-considérables, par suite susceptibles d'une mesure précise, et en amenant toujours les ménisques au même repère, on évite toute incertitude de graduation. »

172. **Description de l'appareil.** — Tel est le principe de la méthode de M. Regnault. Donnons maintenant quelques détails succincts sur la construction de l'appareil. Un vase cylindrique en fonte V (*fig.* 101) servait de réservoir à mercure ; il communiquait par un long canal C, placé à sa partie inférieure, avec le tube fermé M et avec le tube ouvert M'. La coupe figurée ci-contre (*fig.* 102), fera comprendre le mode de jonction des tubes avec les tubulures T et T' du canal C. Sur le cylindre V, est adaptée une pompe foulante à eau S, qui permet d'exercer immédiatement une forte pression sur une petite masse d'eau placée au-dessus du mercure ; elle est mue à l'aide du levier L et de la bielle articulée B.

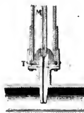


Fig. 102.

Le tube M communique par sa partie supérieure avec un réservoir où le gaz sur lequel on veut opérer est comprimé, par l'emploi de pompes foulantes. Il est entouré d'un manchon K dans lequel circule un courant d'eau froide. Le tube M', que nous appellerons désormais manomètre à air libre, est formé d'une série de tubes en cristal ayant chacun 3 mètres de longueur, 10 millimètres de diamètre intérieur et 5 millimètres d'épaisseur. Ils sont maintenus dans une position déterminée, le long d'une planche en sapin parfaitement verticale, et fixée à un mur en maçonnerie, au moyen de scellements en fer. Les tubes sont superposés et réunis bout à bout, par un moyen très-ingénieux, qui empêche toute fuite du mercure et que nous décrirons avec quelques détails, parce qu'il est applicable à une foule d'appareils.

A chacune de leurs extrémités, les tubes de verre sont mastiqués dans une douille en fer terminée par un cône *a* (*fig.* 103). Les cônes de deux tubes consécutifs sont d'abord rapprochés par leur base, et ils compriment, entre eux, une rondelle en cuir graissée qui permettra d'obtenir une fermeture plus hermétique. Puis, à l'aide du collier *c* à charnière *m*, et à gorge intérieure creuse, qu'on peut serrer plus ou moins avec la vis V, on exerce sur tout le contour des deux cônes en fer une pression aussi grande qu'on veut, sans produire aucun effet de torsion. De plus, l'appareil peut être monté et démonté dans un temps très-court, et néanmoins, à la jonction des tubes, toute fuite de liquide est impossible.

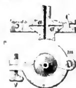


Fig. 103.

173. **Marche des expériences.** — Ce que nous avons déjà dit sur le principe de la méthode, fait comprendre la marche des expériences. Par l'intermédiaire du robinet R', on fait arriver le gaz dans le tube M, en l'obligeant à occuper le volume initial 1 ou V_0, sous une pression arbitraire P_0, dont on a la valeur en ajoutant à la distance des niveaux du mercure en M et en M' la hauteur barométrique au moment de l'expérience : puis, on ferme R', on ouvre R, et par le jeu de la pompe à eau S, on réduit l'air au volume $\frac{1}{2}$ ou à V_1 ; on mesure alors la distance des niveaux du mercure dans les tubes manométriques, et en y ajoutant toujours la hauteur barométrique, on a la pression correspondante P_1. Si la loi de Mariotte s'applique au gaz étudié, on doit avoir, quelle que soit la grandeur de la pression :

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{H_1}{H_0},$$

ou

$$\frac{V_0 H_0}{V_1 H_1} = 1.$$

174. **Résultats obtenus.** — Dans chacune de ses expériences, M. Regnault faisait la correction de température pour la hauteur de la colonne mercurielle évaluée. Il calculait aussi ce qu'eût été la hauteur du baromètre qu'on observait à la surface du sol, si la cuvette de l'instrument avait été transportée sur le plan horizontal correspondant au niveau du mercure dans le manomètre à air libre. En un mot, les diverses corrections qui pouvaient influer, d'une manière sensible, sur le résultat étaient faites avec le plus grand soin. Toutes ces précautions étant prises, il a reconnu que pour l'air, l'azote, l'acide carbonique, le quotient $\frac{V_0 H_0}{V_1 H_1}$ est toujours plus grand que 1, et qu'il va en augmentant d'une manière très-régulière à mesure que la pression devient plus considérable. Or, si le rapport en question est supérieur à l'unité, c'est que la valeur observée pour V_1 est plus petite que

celle qu'indique la loi de Mariotte ; donc, *les trois gaz* que nous venons de nommer *ne suivent pas rigoureusement la loi de Mariotte ; ils se compriment un peu plus que cela ne devrait avoir lieu. d'après cette loi*. Pour l'air et pour l'azote, les écarts sont faibles, mais cependant assez considérables pour qu'on puisse les évaluer avec certitude. Pour l'acide carbonique, les écarts deviennent notables, quand on opère sous des pressions un peu fortes ; ainsi, en partant d'une pression initiale d'une atmosphère, le rapport, concernant ce dernier gaz $\frac{V_0H_0}{V_1H_1} = 1{,}0076$, tandis qu'en prenant comme point de départ $H_0 = 12^{atm},66$ il devient égal à 1,0999.

Le gaz hydrogène ne suit pas non plus exactement la loi de Mariotte ; mais il s'en écarte en sens contraire ; il éprouve une diminution de volume moindre que celle qui est indiquée par la loi, et sa compressibilité décroît à mesure que la pression augmente. M. Regnault compare la force élastique de l'hydrogène à celle d'un ressort métallique, qui offre une résistance d'autant plus grande à la compression, qu'il se trouve déjà soumis à une pression plus considérable.

On pourrait objecter que les écarts signalés par M. Regnault tiennent peut-être à une évaluation inexacte de la valeur du rapport $\frac{V_0}{V_1}$; s'il a été mal déterminé et estimé au delà de sa valeur véritable. il n'est pas étonnant que, dans les expériences faites sur l'air. l'azote et l'acide carbonique, on trouve pour le quotient $\frac{V_0H_0}{V_1H_1}$ un nombre plus grand que 1. M. Regnault répond à cette objection que si cette cause était la vraie, on eût dû obtenir, dans la série des expériences, un nombre toujours plus grand que 1, à peu près de la même quantité, tandis qu'au contraire, la différence va croissant d'une manière régulière, à mesure que H_0 augmente lui-même.

175. **Conclusion générale.** — En résumé, les expériences de M. Regnault exécutées par la méthode que nous venons d'indiquer et d'autres essais sur la compressibilité des gaz, essais dans lesquels on soumettait ces corps à des températures très-diverses et que nous ne pouvons décrire ici, conduisent à ce résultat général : qu'aucun des gaz que nous sommes obligés de prendre à la température ordinaire, ne suit exactement, dans ses variations de volume, la loi énoncée par Mariotte. Les gaz permanents s'en écartent peu, et la loi peut leur être appliquée sans erreur notable ; les gaz liquéfiables s'en écartent d'autant plus que nous les prenons à une température plus voisine de leur point de liquéfaction. Néanmoins, pour ces derniers, la compressibilité réelle se rapproche d'autant plus de la compressibilité théorique qu'on les étudie à des températures plus élevées.

II. — MÉLANGE DES GAZ

176. Expériences de Berthollet. — Citons d'abord une expérience qui est fondamentale dans la question :

Berthollet mit en communication directe, par leur col ouvert, deux ballons de verre remplis, l'un d'hydrogène, l'autre d'acide carbonique, à la même pression et à la même température. Appelons V et V' leurs capacités respectives, et H la pression initiale de chaque fluide. Le ballon contenant le plus dense des deux gaz, l'acide carbonique, fut placé au-dessous de l'autre. L'appareil resta déposé dans une cave profonde, où il ne se produisait aucune variation de température capable d'engendrer des courants, au sein des deux masses gazeuses. Au bout de plusieurs heures, Berthollet reconnut, que la pression totale était égale à H et que les deux gaz s'étaient mélangés si intimement, qu'ils se trouvaient, en même proportion, dans les deux ballons.

Nous concluons de là, que malgré l'égalité de pression qui, dès le début de l'expérience, s'exerçait sur la surface de séparation des deux gaz, l'équilibre n'a pas existé, et que chaque gaz s'est répandu dans le ballon qu'il n'occupait pas, tout d'abord, comme il l'eût fait si ce ballon avait été vide de toute matière pondérable.

En partant de cette dernière conception : que chaque gaz est dans le ballon, comme si l'autre n'existait pas, on comprend que la pression finale du mélange ait été trouvée égale à H; car l'hydrogène, qui occupait d'abord le volume V à la pression H, a dû occuper le volume $V + V'$ à la pression x; x étant donné, d'après la loi de Mariotte, par l'égalité :

$$(V + V')\, x = VH \quad \text{ou} \quad x = \frac{V}{V + V'}\, H.$$

De même, en appelant y, la force élastique qu'a dû prendre l'acide carbonique, on aura $y = \frac{V'}{V + V'} H$. La force élastique du mélange sera devenue $x + y$ ou $\frac{V + V'}{V + V'} H$, c'est-à-dire H, comme l'expérience l'a indiqué.

177. Loi du mélange des gaz. — Toutes les expériences ultérieures ont montré que le fait découvert par Berthollet pouvait être généralisé, et que des gaz en nombre quelconque, pourvu qu'ils n'exercent entre eux aucune action chimique, se diffusent complétement les uns dans les autres, quand on les met en contact. Chacun d'eux occupe, au bout d'un certain temps, le volume total du mélange, et possède une force élastique qui dépend uniquement du nouveau volume qu'il a pris.

On énonce habituellement cette loi sous la forme que lui a donnée Dalton. *Dans un mélange de plusieurs gaz qui n'agissent pas chimiquement l'un sur*

l'autre, la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques qu'aurait chaque gaz, s'il occupait seul le volume total du mélange.

Ainsi, soient trois gaz dont les volumes primitifs sont représentés par V, V', V'', les pressions primitives par H, H', H''. Ces volumes et ces pressions ont été évalués à l'aide d'éprouvettes graduées en parties d'égale capacité, placées sur le mercure : le volume de chaque gaz est donné par le chiffre d'affleurement de la colonne mercurielle dans l'éprouvette qui sert à le mesurer ; la pression s'obtient, en retranchant de la hauteur barométrique, la distance des niveaux du mercure dans l'éprouvette et dans la cuve.

Les trois gaz sont introduits successivement dans une même cloche graduée disposée comme la précédente, et c'est en l'enfonçant plus ou moins dans le mercure, que l'opérateur fait occuper au mélange tel volume V''' qu'il désire. On trouve que la force élastique H''' de ce mélange, estimée comme il vient d'être dit, satisfait toujours à la relation :

$$H''' = \frac{VH + V'H' + V''H''}{V'''}$$

qui se déduit de la loi énoncée ; car, d'après cette loi, la force élastique du premier gaz est devenue :

$$x = \frac{VH}{V'''},$$

celle du second :

$$y = \frac{V'H'}{V'''};$$

celle du troisième :

$$z = \frac{V''H''}{V'''}.$$

La force élastique du mélange $x + y + z$ ou H''' sera donc :

$$H''' = \frac{VH + V'H' + V''H''}{V'''}.$$

L'expérience de Berthollet rentre, comme un cas particulier, dans la loi générale que nous venons de formuler. On a, pour elle, $H' = H$; $H'' = H$, et $V + V' + V'' = V'''$; on en déduit alors $H''' = H$.

III. — DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES

178. Les gaz ne se mélangent pas seulement avec les autres gaz, ils se diffusent encore dans les liquides avec lesquels on les met en contact et occupent bientôt le même volume. On a une preuve évidente de cette pénétration, dans le phénomène que présente l'eau pure exposée au con-

tact de l'air. On retrouve, au bout d'un certain temps, en dissolution dans cette eau, tous les gaz qui entrent dans la constitution de l'atmosphère, et notamment l'azote et l'oxygène. Il suffit, en effet, de faire bouillir l'eau aérée, pendant un certain temps, pour qu'il soit possible de recueillir les gaz primitivement dissous, dans des éprouvettes graduées, où l'on peut ensuite en estimer le volume. Mais, tandis que, dans le mélange de plusieurs gaz, la nature de chaque fluide élastique est sans influence sur la pression du mélange; dans le cas de la diffusion des gaz dans les liquides, on doit tenir compte, quand il s'agit de prévoir le résultat final, de la nature propre du gaz et de celle du liquide.

179. Première loi. — **Coefficient de solubilité.** — *Lorsqu'un liquide est en contact avec une atmosphère indéfinie d'un certain gaz, le volume de gaz dissous, ramené à la pression de cette atmosphère, est dans un rapport constant avec le volume du liquide employé, quelle que soit d'ailleurs la valeur absolue de la pression.* — C'est ce rapport constant, dépendant de la nature du gaz et de celle du liquide, qu'on appelle : *Coefficient de solubilité.*

Toutefois, comme la solubilité d'un gaz dépend aussi de la température, on convient de placer le liquide à 0°, au moment de la dissolution, et de ramener le volume du gaz dissous à cette même température de 0° et à la pression du gaz placé au-dessus du liquide. C'est le rapport entre ce dernier volume estimé dans les conditions qui viennent d'être précisées et celui du liquide à 0°, qu'on nomme coefficient de solubilité du gaz à 0°.

Si nous nommons V le volume du liquide et $\frac{1}{n}$ le coefficient de solubilité; d'après la loi énoncée, le volume du gaz dissous ramené à la pression de l'atmosphère sera $\frac{1}{n}$ V. Si, d'autre part, nous désignons par d' la densité du gaz dissous, en supposant qu'il est libre et qu'il occupe le volume total V du liquide (*), et par d, celle du gaz extérieur; le poids du gaz dissous sera Vd', le poids de la même masse gazeuse ramenée à la pression extérieure aura pour expression nouvelle $\frac{1}{n}$ Vd. On aura donc : $Vd' = \frac{1}{n} Vd$ ou $d' = \frac{1}{n} d$, c'est-à-dire que *le volume du liquide demeurant constant, le poids de gaz dissous est proportionnel à la densité ou à la pression du même gaz placé au-dessus du liquide.*

C'est une autre forme de la même loi. Il en résulte immédiatement que le gaz déjà dissous dans un liquide se dégagera de lui-même, en totalité, lorsqu'on placera la dissolution, dans le vide de la machine pneumatique.

(*) Le mot densité n'a pas ici le sens qu'on lui attribue quand il s'agit des gaz, cas particulier, où l'on prend habituellement la densité de l'air pour terme de comparaison. Il signifie le poids de l'unité de volume du gaz, dans les conditions de température et de pression où il se trouve actuellement placé.

Il en résulte encore, qu'en augmentant, par des moyens quelconques, la pression d'un gaz au-dessus d'un liquide, on pourra accroître considérablement le poids du gaz absorbé.

C'est précisément sur ce principe qu'est fondée la fabrication des eaux gazeuses artificielles, telles que l'eau de Seltz, par exemple. On parvient à faire dissoudre aisément, à l'eau ordinaire, cinq ou six fois son volume d'acide carbonique, en mettant en contact avec elle le gaz fortement comprimé.

180. Deuxième loi. — *Lorsqu'une atmosphère formée de plusieurs gaz est en contact avec un liquide, chacun des gaz se dissout comme s'il était seul et qu'il possédât la force élastique qui lui est propre dans l'atmosphère actuelle.* Ainsi l'azote et l'oxygène qui, dans l'air, peuvent être considérés comme représentant, le premier les $\frac{4}{5}$ du volume total, le second le $\frac{1}{5}$ du même volume, se dissoudront l'un et l'autre comme s'ils étaient seuls, avec le coefficient de solubilité qui leur est propre — 0,0203 pour l'azote — 0,0416 pour l'oxygène — toutes les fois que l'air atmosphérique sera mis en contact prolongé avec l'eau. Il faudra seulement, quand on voudra calculer *à priori* les poids de gaz dissous, supposer que l'eau est successivement en présence d'une atmosphère indéfinie d'azote dont la pression est $\frac{4}{5}$ d'atmosphère et d'une atmosphère indéfinie d'oxygène dont la pression est $\frac{1}{5}$ d'atmosphère. On trouve alors par le calcul, ce que l'expérience vérifie parfaitement : que l'air extrait de l'eau est beaucoup plus riche en oxygène que l'air atmosphérique ; il renferme une proportion d'oxygène égale à 33,5 p. 100 de son volume.

Cette seconde loi nous permet de comprendre pourquoi une dissolution d'un gaz dans l'eau s'appauvrit de plus en plus, quand on la met en présence d'une atmosphère de gaz étrangers. La pression de ces derniers est sans influence sur le gaz dissous ; celui-ci se dégagera donc, comme il l'eût fait dans le vide absolu. C'est ainsi que l'ammoniaque liquide qui est une dissolution si riche de gaz ammoniac dans l'eau, perd tout son gaz quand on l'abandonne à l'air libre. On s'explique encore pourquoi une éprouvette pleine d'hydrogène qu'on abandonne sur la cuve à eau ne contient plus, au bout d'un temps assez long, que de l'azote et de l'oxygène. C'est que l'eau de la cuve renfermant déjà les gaz de l'atmosphère en dissolution, la partie de cette eau qui est en contact avec l'hydrogène les laisse dégager, comme elle le ferait dans un espace vide : au contraire, l'hydrogène de l'éprouvette se dissout de plus en plus dans l'eau qui n'en contenait d'abord aucune trace et qui, après l'avoir dissous en partie, va le perdre dans l'atmosphère ambiante. Il s'établit ainsi, à travers le liquide, deux courants de sens contraire, l'un des gaz de l'air,

vers l'éprouvette ; et l'autre, de l'hydrogène vers l'atmosphère extérieure.

181. **Indication des coefficients de solubilité des principaux gaz.** — Voici les valeurs des coefficients de solubilité, dans l'eau, des gaz les plus importants :

NOMS DES GAZ.	VALEUR DE $\frac{1}{n}$ à 0°.
Azote	0,02035
Oxygène	0,01116
Oxyde de carbone	0,03287
Gaz des marais	0,05449
Gaz oléfiant	0,25629
Acide carbonique	1,79669

Il est bien entendu, dans tout ce qui précède, que les gaz employés n'exercent aucune action chimique sur les liquides avec lesquels on les met en contact.

APPLICATION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AUX GAZ

182. **Baroscope.** — Les considérations que nous avons développées permettent d'affirmer que le principe d'Archimède s'applique tout aussi bien aux gaz qu'aux liquides ; et nous pouvons énoncer cette loi comme tout à fait générale : *Tout corps plongé dans un fluide éprouve, de la part de ce dernier, une poussée verticale dirigée de bas en haut et égale au poids du fluide déplacé.*

On peut rendre sensible, par une expérience due à Otto de Guericke, l'influence de la pression exercée par l'air sur les corps qui y sont immergés. A chacune des extrémités du fléau d'une balance (*fig.* 104) est suspendue une sphère de cuivre. L'une des sphères est creuse, à parois minces, l'autre au contraire est massive. Leur poids est tel qu'elles se font mutuellement équilibre dans l'air; le fléau qui les supporte demeure horizontal. Comme cet équilibre pourrait être troublé, par suite des variations de constitution de l'atmosphère, on a la faculté de le rétablir à volonté, en faisant tourner le bouton à vis B, auquel est suspendue la sphère massive; car, de cette façon, on allonge ou on raccourcit à volonté le bras de levier à l'extrémité duquel agit cette sphère. L'équilibre étant produit, on porte cette petite balance, qu'on nomme le *Baroscope*, sous le récipient de la machine

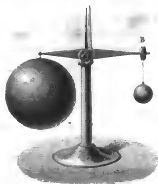


Fig. 104.

pneumatique et l'on fait le vide. On voit aussitôt le fléau s'incliner d'une quantité très-notable, du côté de la sphère creuse. L'expérience est décisive; elle montre que, dans le baroscope, la sphère la plus grosse a, en même temps, un poids absolu plus considérable. Or, comme les deux sphères se font équilibre dans l'air, il faut admettre que celle qui déplace un plus grand volume de ce fluide subit un excédant de poussée qui compense son excès de poids. L'existence d'une poussée qui augmente avec le volume du fluide déplacé se trouve donc ainsi démontrée.

183. **Correction due à la poussée de l'air dans les pesées.** — L'existence de cette poussée prouve la nécessité d'une correction quand on effectue, à la façon ordinaire, des pesées dans l'air atmosphérique. Les chiffres inscrits sur les poids échantillonnés correspondent à leur poids absolu; et pourtant, ces petites masses de métal éprouvent elles-mêmes, en même temps que le corps dont on veut estimer le poids exact, une poussée qui peut, dans certains cas, n'être pas négligeable. Indiquons la manière d'effectuer cette correction. Soient x le poids absolu du corps que l'on veut peser, D son poids spécifique; $\frac{x}{D}$ sera son volume; soit P l'indication des poids échantillonnés qui lui font équilibre, d le poids spécifique du métal qui forme ces derniers; $\frac{P}{d}$ sera leur volume. La pression vraie exercée par les poids gradués sur le bassin de la balance est égale à leur poids réel P, moins le poids d'un volume d'air égal au volume des poids $= P\left(1-\frac{\varepsilon'}{d}\right)$ en nommant ε' le poids spécifique de l'air au sein duquel se fait la pesée. Pour la même raison, la pression vraie exercée par le corps qu'on pèse sur l'autre bassin ou sur le même bassin, quand on emploiera la méthode des doubles pesées, sera $x\left(1-\frac{\varepsilon'}{D}\right)$. On aura donc, puisqu'il y a équilibre dans l'air :

$$x\left(1-\frac{\varepsilon'}{D}\right) = P\left(1-\frac{\varepsilon'}{d}\right),$$

d'où

$$x = P\,\frac{(d-\varepsilon')D}{(D-\varepsilon')d}.$$

Il est évident d'abord que, si le corps dont on veut avoir le poids, est de même nature que les poids gradués, toute correction est inutile; en faisant $d = D$ on a en effet $x = P$; en outre, la correction n'a une importance réelle que lorsqu'on pèse des corps d'une faible densité.

184. **Aérostats.** — Un corps placé dans l'atmosphère est toujours soumis à deux forces agissant en sens contraire; l'une, son poids, qui tend à le faire descendre, l'autre, le poids du volume d'air déplacé, qui tend à le

faire monter. Pour les solides et les liquides qui sont beaucoup plus denses que l'air, la chute est toujours nécessaire, quand le corps est abandonné à lui-même. Pour les gaz, il en est autrement. Un assez grand nombre de ces fluides possèdent un poids spécifique plus faible que celui de l'air : tels sont l'hydrogène, l'hydrogène protocarboné, l'ammoniaque, et encore le gaz de l'éclairage qui n'est qu'un mélange, à proportions variables, de diverses substances gazeuses. Enfin, l'air chaud lui-même constitue un gaz d'une densité moindre que celle de l'air ambiant. On comprend donc, que si l'un ou l'autre de ces fluides élastiques est emprisonné dans une enveloppe imperméable très-légère, la masse gazeuse, ainsi isolée, subissant de la part de l'air extérieur une poussée supérieure à son propre poids, devra s'élever dans l'atmosphère. On nomme *force ascensionnelle*, la différence entre la poussée de l'air d'une part et d'autre part, le poids du gaz et de son enveloppe. Les frères Montgolfier sont les premiers qui aient utilisé la force ascensionnelle de l'air chaud, pour élever dans l'atmosphère des corps d'une grande densité. Ils fabriquèrent, à cet effet, un grand ballon sphérique, ouvert à la partie inférieure, dont l'enveloppe en toile mince doublée de papier n'avait qu'un faible poids et était à peu près imperméable aux gaz. Ils le remplirent d'air chaud et de fumée, en faisant brûler de la paille humide au-dessous de son ouverture inférieure. Le ballon gonflé par l'air dilaté qui y arrivait en abondance déplaça bientôt un volume d'air considérable, dont le poids était supérieur au sien ; et dès lors il put s'élever dans l'atmosphère à une assez grande hauteur. Cette expérience, très-remarquable pour l'époque où elle fut tentée, eut lieu à Annonay le 5 juin 1783. Du nom des inventeurs, les ballons ainsi construits portèrent le nom de *montgolfières*.

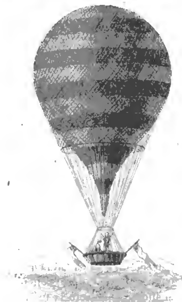


Fig. 105.

185. Substitution de l'hydrogène à l'air chaud. — Peu de mois après, le physicien Charles eut l'heureuse idée de substituer à la fumée le gaz hydrogène dont la densité est les 0,0692 de celle de l'air. Les montgolfières présentaient, en effet, l'inconvénient grave de laisser perdre promptement dans l'atmosphère la chaleur contenue dans le gaz dilaté qui les gon-

flait, ou bien il fallait suspendre un réchaud plein de charbon au-dessous de l'ouverture inférieure des ballons, et c'était là, on le comprend, une cause fréquente d'incendie.

Aérostats gonflés par l'hydrogène. — La substitution de l'hydrogène à l'air chaud fut donc un grand progrès; elle permettait aux ballons, qu'on nomma bientôt des aérostats, de s'élever, sans accident probable, à une plus grande hauteur, et de se maintenir plus longtemps dans l'atmosphère. Déjà quelques voyages aériens avaient été entrepris, par l'emploi dangereux de l'air échauffé; ces voyages se multiplièrent, quand on sut gonfler les ballons avec l'hydrogène. Mais la plupart de ces ascensions eurent pour mobile unique la curiosité, et la science n'en retira aucun profit. Quelques-unes cependant, en petit nombre, furent entreprises dans un but purement scientifique : On doit citer, parmi ces dernières, l'ascension de MM. Biot et Arago en 1804 : ces physiciens s'élevèrent ensemble à 4 000 mètres de hauteur, et un peu plus tard, Gay-Lussac seul monta jusqu'à 7 000 mètres. Beaucoup plus récemment, en 1850, MM. Barral et Bixio sont parvenus à peu près à la même hauteur que Gay-Lussac ; et, sans une déchirure qui se produisit à la partie inférieure de leur ballon, et qui diminua subitement la force ascensionnelle, ils auraient atteint infailliblement des régions jusques alors inexplorées de l'atmosphère. Nous indiquerons, au chapitre de la Météorologie, les résultats importants dont ces voyages scientifiques ont enrichi la physique du globe.

186. **Emploi du gaz d'éclairage.** — Aujourd'hui, les ballons sont souvent gonflés pour les ascensions ordinaires, où l'on ne doit pas atteindre une très-grande hauteur, avec le gaz d'éclairage, dont la densité moyenne, rapportée à celle de l'air, est de 0,55. Ce gaz étant plus dense que l'hydrogène, la force ascensionnelle qu'il développe par mètre cube de gaz employé, est nécessairement moindre; mais on y supplée en augmentant la capacité du ballon. L'aérostat (*fig.* 105) est entouré d'un filet de corde, lequel supporte la nacelle dans laquelle se placent les voyageurs. Au départ, le ballon n'est jamais qu'incomplétement gonflé, parce que, la pression de l'air extérieur diminuant à mesure qu'on s'élève, le gaz intérieur doit pouvoir, en se dilatant librement, suivre les mêmes variations; par ce moyen, l'enveloppe du ballon, également pressée des deux côtés, ne peut subir aucune rupture. Une soupape placée à la partie supérieure du ballon, et que l'aéronaute ouvre ou ferme à l'aide d'un cordon qui arrive dans la nacelle, permet, au besoin, de laisser une partie du gaz s'échapper, et diminue ainsi la force ascensionnelle. Enfin, des sacs pleins de sable servant de lest sont toujours placés dans la nacelle. Quand le ballon est déjà parvenu près du sol et qu'on s'aperçoit que la descente offrirait quelque difficulté, on peut, en laissant tomber un peu de sable, remonter de nouveau dans l'atmosphère, et opérer la descente un peu plus loin.

187. Théorie des aérostats. Mesure de la force ascensionnelle. — Soit π le poids de l'hydrogène qui remplit le ballon, δ son poids spécifique correspondant à la température et à la pression qu'il possède au moment de l'ascension, d le poids spécifique de l'air dans les mêmes conditions, v le volume de tous les corps que le ballon doit entraîner avec lui (cordages, nacelle, aéronaute, etc.), P le poids total du ballon (y compris l'hydrogène) et de ses annexes.

Le volume du ballon est $\frac{\pi}{\delta}$; le volume total du ballon et de ses annexes, $\frac{\pi}{\delta} + v$: c'est aussi le volume total d'air déplacé ; donc, le poids de cet air ou la poussée, sera $\left(\frac{\pi}{\delta} + v\right) d$; par suite la force ascensionnelle A aura pour expression :

$$A = \pi \frac{d}{\delta} + vd - P. \qquad (1)$$

On peut, à l'aide de cette égalité, se proposer de calculer, *à priori*, quelle doit être la valeur de $\frac{\pi}{\delta}$ ou du volume du ballon, pour que la force ascensionnelle soit égale à un nombre déterminé de kilogrammes. Alors $\frac{\pi}{\delta}$ est l'inconnue x dans cette égalité, et on se donne A, v, d. Quant à P, il se compose de deux parties : 1° le poids P_1, qu'on se donne, des corps que le ballon doit élever dans l'atmosphère ; 2° le poids δx de l'hydrogène qui remplit le ballon. On doit donc, pour résoudre la question, écrire l'égalité :

$$A = dx + vd - P_1 - \delta x$$

d'où l'on déduira x.

La valeur (1) de A, que nous avons obtenue en premier lieu, montre que la force ascensionnelle est sensiblement la même, tant que le ballon n'est pas complétement gonflé. En effet, $\pi \frac{d}{\delta}$ est constant ; car, si, au point de départ, la force élastique de l'air et de l'hydrogène est H, et qu'à une certaine hauteur elle devienne H', d'après la loi de Mariotte, la densité d'un gaz étant proportionnelle à la pression qu'il supporte, la densité de l'air sera devenue $d \frac{H'}{H}$. Pour la même raison, celle de l'hydrogène sera devenue $\delta \frac{H'}{H}$; donc le rapport des deux densités sera toujours $\frac{d}{\delta}$ et le terme $\pi \frac{d}{\delta}$ sera demeuré invariable. Quant à P, il est évidemment constant. Le terme vd décroît seul à mesure qu'on s'élève ; mais, comme v est très-petit en présence du volume du ballon, la variation de ce terme sera sans influence. Nous pouvons donc affirmer que, tant que le ballon n'est pas complétement gonflé, son mouvement serait uniformément varié s'il ne se mouvait pas dans un milieu résistant.

A partir du moment où le ballon a acquis son volume maximum, δ reste constant, tandis que d continue à décroître ; donc la force ascensionnelle diminue, et l'aérostat doit s'arrêter dans une couche pour laquelle la densité x de l'air sera donnée par l'expression

$$\pi \frac{x}{\delta'} + vx - P = 0,$$

δ' étant la densité définitive, calculable à l'avance, qu'a prise l'hydrogène quand le ballon est complétement gonflé. Si, lorsqu'il est parvenu dans cette couche, l'aéronaute veut descendre, il ouvre la soupape pour laisser échapper un peu d'hydrogène ; la force ascensionnelle devient négative, le ballon se rapproche du sol. S'il veut ensuite remonter, l'aéronaute jette du lest : il diminue ainsi la valeur de P. et la force ascensionnelle redevient positive.

CHAPITRE VI

APPLICATIONS DE LA LOI DE MARIOTTE. — MANOMÈTRES. — MACHINE PNEUMATIQUE. — MACHINE DE COMPRESSION

I. — MANOMÈTRES

188. **Principe théorique.** — Les manomètres sont des instruments destinés à mesurer la force élastique d'un gaz ou d'une vapeur contenus dans un récipient. On en distingue de trois sortes : 1° Manomètres à air libre ; 2° manomètres à air comprimé ; 3° manomètres métalliques. Nous avons déjà vu l'emploi des manomètres à air libre dans les appareils de Dulong et Arago et de M. Regnault, pour la vérification de la loi de Mariotte. Là, la force élastique du gaz est équilibrée et mesurée par le poids d'une colonne de mercure. Pour chaque atmosphère d'accroissement dans la force élastique du gaz, il y a une augmentation, en moyenne, de 76 centimètres dans la hauteur de la colonne mercurielle. De cette façon, on a un instrument qui, à toutes les époques, présente le même degré de sensibilité.

Le tube fermé et plein d'air de l'appareil de M. Regnault (171, 172) représente un manomètre à air comprimé. Si l'on admet, ce que l'on peut faire sans erreur notable, que l'air suit, dans sa compressibilité, la loi de Mariotte, on pourra déduire du volume que prendra la masse gazeuse dans le tube

fermé et gradué en parties d'égale capacité, la valeur de sa force élastique. Celle-ci pourra donc servir à estimer facilement la pression du gaz ou de la vapeur contenus dans le récipient qui communiquera avec le manomètre, par l'intermédiaire d'une colonne de mercure. On aura, il est vrai, dans ce cas, un appareil dont la sensibilité est décroissante comme nous l'avons expliqué plus haut (170); mais cet inconvénient est minime, quand il s'agit d'applications industrielles. — Nous connaissons le principe théorique des deux premières espèces de manomètres, il ne nous reste plus qu'à entrer dans les détails de leur construction.

189. Manomètres à air libre. — Pour les recherches précises que l'on a à exécuter en physique, le meilleur manomètre à air libre est celui de M. Regnault, dont nous aurons maintes fois à indiquer l'emploi. Il se compose de deux tubes de verre verticaux T et T' (*fig.* 106), à peu près d'égal diamètre, fixés contre une planchette de bois et mastiqués tous les deux à leur partie inférieure dans un robinet de fonte R, que l'on nomme robinet à trois voies. Le noyau de ce robinet est percé de deux canaux *a* et *b* (*fig.* 106 *b*): l'un *a* le traverse complétement; l'autre *b*, à angle droit avec le premier, aboutit à l'axe seulement. Cette disposition permet, 1° de faire communiquer ensemble les deux tubes du manomètre, sans que le mercure qu'ils contiennent puisse s'écouler à l'extérieur (on donne alors au robinet la position indiquée par la figure 106 *a*); 2° ou bien de faire communiquer les deux tubes ensemble et avec l'air extérieur (*fig.* 106 *b*); 3° ou bien, en tournant encore de 90° et de 180°, dans le sens de la flèche, de faire communiquer chacun des tubes séparément avec l'extérieur. Le tube T' est mis en relation avec le récipient dans lequel se trouve le gaz dont on veut connaître la force élastique : le tube T s'ouvre dans l'atmosphère. Veut-on laisser constant le volume du gaz considéré et mesurer seulement les variations de sa force élastique?

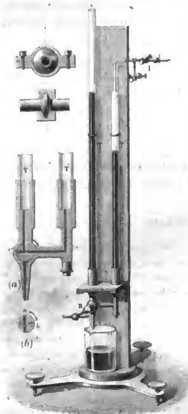


Fig. 106.

On amène, dans toutes les opérations, le niveau du mercure dans le tube T' en affleurement avec un trait marqué sur ce tube. Cette opération est rendue facile par le maniement du robinet R. Il n'y a plus alors qu'à mesurer, avec le cathétomètre, les distances des niveaux du mercure dans les deux branches du manomètre, et à l'ajouter à la hauteur barométrique ou à l'en retrancher, pour avoir la force élastique du gaz confiné, avec une grande exactitude. Dans l'industrie, on emploie moins souvent les manomètres à air libre que dans les expériences de physique, surtout quand il s'agit de mesurer des pressions de 7 ou 8 atmosphères. La colonne de mercure devrait atteindre, dans ce cas, des hauteurs de 6 ou 7 mètres, et l'appareil devient alors très-encombrant. On peut, il est vrai, enterrer les tubes en partie dans le sol et, par une disposition simple, rendre les variations apparentes de hauteur de la colonne mercurielle, pour une atmosphère de pression, en plus ou en moins, beaucoup moindres que $0^m,76$; mais on n'évite pas, pour cela, les secousses violentes qu'éprouve cette colonne mobile de liquide dans le tube où elle est contenue, et quelquefois même, la projection d'une partie du mercure, lorsqu'il se produit de brusques changements dans la pression de la vapeur.

190. **Manomètres à air comprimé.** — Le manomètre à air comprimé ne présente aucun de ces inconvénients. Il se compose d'une large cuvette M (*fig.* 107) en partie pleine de mercure, et encastrée dans un cylindre de fonte ou de bronze surmonté d'une cloche en verre C, à parois épaisses. Vers la partie supérieure de la cuvette, est fixé d'une manière invariable, un tube de diamètre étroit que nous supposerons parfaitement calibré. Enfin la capacité du cylindre de bronze, et, par suite, le mercure de la cuvette se trouvent en communication avec le gaz ou la vapeur dont on veut mesurer la pression, par l'intermédiaire du robinet R. Dans ces conditions, quand la pression sera égale à une atmosphère, le mercure se placera à la même hauteur dans le tube et dans la cuvette; quand elle croîtra, le liquide montera dans le tube; tandis que, dans la cuvette, les variations du niveau seront insensibles à cause de la grandeur de sa section. Alors la réduction de volume subie par l'air dans le tube donnera la mesure de la force élastique qu'on veut estimer.



Fig. 107.

191. **Graduation.** — La graduation peut être faite, par le calcul, de la manière suivante : appelons l la longueur du tube manométrique, comptée depuis le niveau dans la cuvette jusqu'à la partie supérieure, r son rayon, H la hauteur de la colonne de mercure correspondant à 1 atmosphère. Enfin, soit x la hauteur à laquelle s'élèvera le mercure dans le manomètre, quand la pression du gaz qui agit sur le liquide

de la cuvette sera de n atmosphères. Le volume initial de l'air contenu dans le tube était $\pi r^2 l$, sa pression était H ; la même masse gazeuse acquiert un volume final $\pi r^2(l-x)$, quand la pression est n H$-x$; on a donc, d'après la loi de Mariotte :

$$lH = (l - x)(nH - x),$$

d'où l'on déduit :

$$x^2 - (l + nH)x + lH(n - 1) = 0,$$

d'où :

$$x = \frac{l + nH \pm \sqrt{(l + nH)^2 - 4lH(n - 1)}}{2};$$

réduisant sous le radical le terme $2nlH$ que donne le carré du binome avec le terme $-4nlH$ qui vient après, on a :

$$x = \frac{l + nH \pm \sqrt{(l - nH)^2 + 4lH}}{2}.$$

La quantité sous le radical est essentiellement positive, les deux racines sont réelles. D'autre part, la racine qui a le signe — au radical, est la seule acceptable ; car l'autre a une valeur plus grande que $\frac{l + nH + l - nH}{2}$ ou que l. Ainsi l'on a :

$$x = \frac{l + nH - \sqrt{(l - nH)^2 + 4lH}}{2},$$

et en y faisant successivement $n = 1\frac{1}{2}, 2, 2\frac{1}{2}, 3$, etc., on déterminera les points où devront être inscrites sur le tube les pressions successives. Mais, les conditions que suppose la théorie ne sont jamais exactement satisfaites ; il vaut mieux graduer le manomètre à air comprimé, par une méthode empirique. A cet effet, on le visse à un réservoir qui porte un manomètre à air libre et dans lequel on fait varier artificiellement la pression de l'air, à l'aide d'une pompe foulante. Alors, les numéros des divisions qu'il faut inscrire sur le tube à graduer sont fournis directement par les indications du manomètre à air libre.

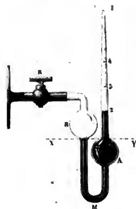


Fig. 108.

192. Autre disposition du manomètre à air comprimé. — L'instrument que nous venons de décrire présente un inconvénient : si l'on oublie de fermer le robinet R, au moment où la vapeur se liquéfie dans la chaudière, un vide partiel se produit dans la cloche B. et un peu d'air s'échappe du tube

manométrique ; l'instrument est, par suite, hors de service. La disposition suivante le met à l'abri de ce genre d'accidents. Le manomètre est formé par un tube de verre à parois épaisses, recourbé en M, fermé en I (*fig.* 108) et portant deux boules A et B de capacités à peu près égales ; il communique avec la chaudière par l'intermédiaire du robinet R. Quand la pression, dans cette chaudière, est de 1 atmosphère, la branche fermée est pleine d'air ; et les deux niveaux de la colonne de mercure qui sépare l'air confiné de la vapeur, sont sur un même plan horizontal. On gradue le manomètre par la méthode empirique qui vient d'être décrite, et si l'on a le soin de terminer le manomètre en IA, par un tube conique, les traits qui correspondent à des variations égales dans la pression peuvent devenir, dans ce cas, à peu près équidistants.

Supposons maintenant que le vide se fasse dans la chaudière : le mercure qui remplissait la boule A passe dans la boule B ; l'air qui occupait l'espace IA se répand dans la boule A, dont la capacité est au moins 50 fois plus grande ; sa force élastique devient $\frac{1}{50}$ d'atmosphère, et dès lors elle peut être équilibrée par la petite colonne de mercure comprise entre les niveaux dans A et dans B.

193. **Manomètre métallique de Bourdon.** — Le principe théorique de cet instrument est le même que celui du baromètre métallique. Un tube de cuivre à parois minces (*fig.* 109), dont la section est figurée ci-contre, est contourné en spirale. Il porte un robinet R qui le met en communication, par l'une de ses extrémités, avec la chaudière ; l'autre extrémité fait marcher la longue aiguille A, qui se meut sur un cadran divisé. La vapeur pénètre dans le tube et en distend plus ou moins les parois métalliques, suivant la pression qu'elle exerce ; il en résulte une variation correspondante de courbure dans la spirale, qui provoque un mouvement de l'aiguille sur le cadran. Le manomètre métallique est gradué par comparaison avec un manomètre à air libre, comme nous l'avons déjà indiqué pour les manomètres à air comprimé. On l'emploie très-fréquemment, surtout pour les locomotives, les locomobiles, où son faible volume le fait préférer à tout autre.



Fig. 109.

II. — MACHINE PNEUMATIQUE

194. Premiers essais. — La machine pneumatique, qui nous a déjà servi bien souvent, dans les précédents chapitres, pour les expériences sur les fluides élastiques, est destinée à raréfier un gaz contenu dans un récipient. Dès le dix-septième siècle, peu après la découverte du baromètre, les académiciens de Florence, voulant faire le vide absolu dans un ballon, le placèrent à la partie supérieure d'un long tube barométrique; ils remplirent le tout de mercure et renversèrent l'appareil dans une cuvette, comme pour la construction du baromètre; le mercure, en descendant, laissa le vide dans le ballon, qu'on put dès lors, sans inconvénient, séparer du tube barométrique. Mais ce procédé, qu'on a voulu renouveler de nos jours, exige l'emploi et le maniement d'une grande masse de mercure; il est par suite fort incommode. On y renonça complétement, lorsque, en 1650, Otto de Guericke eut inventé sa machine pneumatique. Celle-ci ne peut, il est vrai, faire un vide comparable à celui de la chambre barométrique; mais, il faut le reconnaître, on a rarement besoin d'un vide aussi parfait dans les expériences de physique; il est bien suffisant, dans la majorité des cas, que la force élastique d'un gaz contenu dans un récipient soit réduite à 1 millimètre ou à $\frac{1}{2}$ millimètre de mercure.

195. Principe théorique. — Voici l'idée fondamentale servant de point de départ dans la construction de la machine pneumatique : 1° faire communiquer le récipient qui contient le gaz à raréfier, avec un premier vase, où le vide existe et dans lequel le fluide élastique du récipient puisse, dès lors, se répandre librement (*); 2° enlever ce vase supplémentaire avec le gaz dont il s'est emparé, et répéter la même suite d'opérations, en employant un deuxième, un troisième espace vide, tous identiques au premier. Chaque fois, le gaz, en pénétrant dans l'espace additionnel qui lui est offert, augmente de volume, et par suite, la force élastique du fluide dans le récipient, décroît de plus en plus.

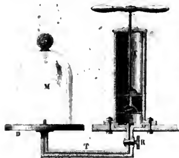


Fig. 110.

196. Description de la machine. — Ceci établi, décrivons les organes essentiels d'une machine pneumatique, et faisons comprendre son fonc-

(*) Nous voulons donner le principe théorique d'une machine destinée à faire le vide, et nous supposons que le vide existe déjà dans un récipient. Il semble qu'il y ait là un cercle

tionnement. Le récipient consiste, par exemple, en une cloche M remplie d'air à la pression ordinaire (*fig.* 110), posée sur un disque de verre parfaitement plan D, qu'on nomme la *platine* de la machine pneumatique. Cette cloche a ses bords bien rodés et frottés avec du suif, pour assurer une fermeture exacte qui empêchera l'air extérieur de rentrer, quand le vide sera fait. L'espace additionnel est constitué par un cylindre creux C, en cuivre ou en cristal, nommé *corps de pompe*, dans l'intérieur duquel un piston peut glisser à frottement doux. Celui-ci est creusé, suivant son axe, d'un canal cylindrique qu'une soupape X, s'ouvrant de bas en haut, peut ouvrir ou fermer en temps utile. Enfin, le tube T, que nous supposerons d'abord muni d'un robinet R, établit la communication entre le corps de pompe et la cloche M.

197. Jeu de la machine. — Loi de la raréfaction. — Expliquons maintenant le jeu de la machine. Le robinet R étant fermé au début, et la soupape Z demeurant abaissée par son propre poids, on soulève le piston qui se trouvait placé d'abord au point le plus bas de sa course. La soupape Z reste fermée par la pression de l'air extérieur; aucun gaz ne peut pénétrer entre le piston et le corps de pompe; le vide se produit donc au-dessous du piston. Ouvrons le robinet : l'air du récipient se précipite dans l'espace vide qui lui est offert; son volume, qui était V, volume de la cloche, devient $V+v$, somme des volumes du récipient et du corps de pompe. Si donc H représente la pression initiale de l'air, la force élastique H_1, du gaz dans le récipient, après cette première ascension du piston, sera donnée, d'après la loi de Mariotte, par la formule : $(V+v)\,H_1 = VH$. D'où :

$$H_1 = \frac{V}{V+v}\,H.$$

Elle est donc une fraction de la force élastique primitive exprimée par $\frac{V}{V+v}$. — Il est bien entendu que nous comprenons dans V et le volume du récipient et la capacité du tube T, capacité qui est d'ailleurs en général négligeable par rapport à celle de M. — Fermons R et faisons descendre le piston. L'air du corps de pompe diminue de volume, augmente de force élastique, et la soupape Z se soulève bientôt, parce qu'elle est plus pressée de bas en haut par l'air qu'on comprime dans le corps de pompe que de haut en bas par l'air extérieur; la portion de gaz enlevée au récipient s'échappe donc dans l'atmosphère, et le corps de pompe est ramené à son état primitif.

vicieux; il n'en est rien en réalité. En se plaçant en dehors de toute connaissance scientifique, n'est-il pas évident *à priori* qu'un piston primitivement en contact avec la base d'un corps de pompe et, qu'on soulève ensuite, laisse le vide s'établir au-dessous de lui? Eh bien! c'est précisément là le moyen que nous emploierons pour réaliser les conditions théoriques qui viennent d'être formulées.

Recommençons la même série d'opérations ; on voit qu'à chaque ouverture du robinet c'est toujours comme un nouvel espace vide V qu'on met en communication avec l'air raréfié du récipient; donc, après la deuxième ascension du piston, la force élastique H_2 du gaz confiné sera devenue :

$$H_2 = \frac{V}{V+v} H_1 = \left(\frac{V}{V+v}\right)^2 H;$$

après la troisième :

$$H_3 = \frac{V}{V+v} H_2 = \left(\frac{V}{V+v}\right)^3 H;$$

après la $n^{ème}$:

$$H_n = \frac{V}{V+n} H_{n-1} = \left(\frac{V}{V+v}\right)^n H.$$

Ainsi la force élastique du gaz contenue dans M décroît comme les termes d'une progression géométrique dont la raison est $\frac{V}{V+v}$. On peut donc dire que le vide absolu n'est pas réalisable avec la machine que nous venons de décrire; car, dans une progression géométrique décroissante, aucun terme n'est jamais nul. Mais il faut ajouter, que s'il n'existait aucune perturbation étrangère, la raréfaction pourrait être augmentée indéfiniment, en multipliant les coups de piston.

198. **Espace nuisible.** — Il n'en est point ainsi dans la pratique ; la raréfaction a toujours une limite qu'on ne saurait dépasser ; la raison en est : qu'au moment où le piston atteint le point le plus bas de sa course, il n'est point en contact parfait avec la base inférieure du corps de pompe, même lorsqu'on remplace (ce qui a toujours lieu dans la machine ordinaire) le robinet R par une soupape conique Z' parfaitement ajustée. Il reste toujours un petit espace u, nommé espace nuisible, dans lequel une portion de l'air contenu dans le corps de pompe vient se loger à chaque coup de piston. Cette masse gazeuse, au moment où le piston s'arrête et où la soupape Z se ferme, possède une force élastique H égale à celle de l'atmosphère. Quand le piston remonte, cette même masse occupe le volume v du corps de pompe, et sa force élastique devient $\frac{u}{v}$ H. Mais, comme c'est elle qui, par son élasticité, tend toujours à empêcher l'air du récipient de pénétrer dans le corps de pompe, au moment où la soupape Z' est ouverte ; elle interdira effectivement tout passage, et il ne sortira plus de gaz du récipient, lorsque la pression du fluide constamment décroissante dans ce dernier, sera devenue elle-même égale à $\frac{u}{v}$ H. Cette fraction, en général très-petite : $\left(\frac{u}{v}\right)$, mesure donc le pouvoir raréfiant de la machine employée.

199. Au reste, la présence de cet espace nuisible modifie un peu l'expression générale de la loi, suivant laquelle varie la raréfaction de l'air dans le récipient. Chaque fois que le piston atteint le haut de sa course, la force

élastique totale du gaz se compose de deux parties : 1° de celle qui est due à l'air du récipient qui s'est répandu dans le corps de pompe ; 2° de celle que fournit la masse d'air stationnaire dans l'espace nuisible, quand elle occupe le volume total $V+v$; cette dernière partie de la pression est évidemment constante en grandeur, à toutes les époques. On peut se proposer comme problème de trouver l'expression générale de la loi dans ces nouvelles conditions.

L'appareil dont nous venons de donner la théorie a été successivement perfectionné par Boyle, Papin, Hauksbee, de Mairan. Décrivons-le maintenant avec les modifications qu'il a subies et tel qu'on le trouve aujourd'hui, dans la plupart des cabinets de physique.

200 (*a*). **Double corps de pompe.** — La machine pneumatique présente deux corps de pompe voisins P et P' tout à fait identiques, communiquant tous les deux avec le récipient par l'intermédiaire du canal bifurqué XYX (*fig.* 111) et dans lesquels se meuvent des pistons dont la tige est à crémaillère. Une roue dentée (*fig.* 113 et 114), dont l'axe porte une manivelle à deux poignées, engrène avec les deux crémaillères et met en mouvement les deux pistons ; par ce moyen, le mouvement circulaire alternatif de la manivelle produit par l'opérateur se trouve transformé en un mouvement de va-et-vient des deux pistons. L'un d'eux s'élève dans le corps de pompe en même temps que l'autre descend. On voit de suite que, grâce à cette disposition, la raréfaction est obtenue beaucoup plus promptement. Mais cette promptitude est le moindre des avantages que l'on retire de l'emploi de deux corps de pompe. Leur utilité réelle consiste en ce que la pression de l'atmosphère ambiante sur les bases supérieures des deux pistons se trouvant à chaque instant équilibrée par elle-même, l'opérateur n'a plus à vaincre qu'une résistance égale à la différence des pressions subies par les bases

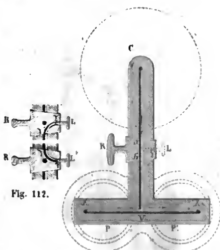


Fig. 112.

Fig. 111. — Plan de la machine pneumatique ordinaire.

XYX conduit bifurqué faisant communiquer les corps de pompe P, P' et le récipient. — R robinet interposé sur le trajet de ce conduit et figuré dans les trois positions qu'il peut occuper, *ab* canal ordinaire, $\gamma\gamma'$ canal servant à la rentrée de l'air. — L tige destinée à fermer ce canal.

inférieures de ces pistons. La manœuvre de la machine est donc rendue ainsi moins pénible, quand l'appareil a de petites dimensions; et elle est rendue possible, quand la machine a un corps de pompe dont la section est telle qu'il faudrait un effort de plusieurs milliers de kilogrammes pour soulever chaque piston, s'il était seul.

201 (*b*). **Soupapes.** — La soupape *s* du piston consiste en un disque métallique ou en un tronc de cône (*fig.* 115) surmontés l'un et l'autre d'une

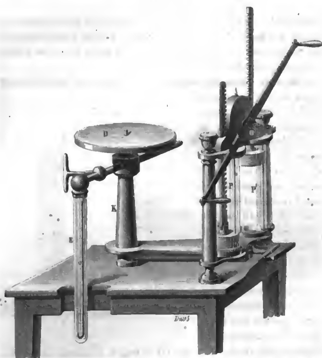


Fig. 113. — Machine pneumatique portant le perfectionnement dû à M. Babinet.
P et P' corps de pompe. — K colonne creuse aboutissant à la platine D. — E éprouvette.

tige *t* perpendiculaire à leur plan. Cette tige passe dans une ouverture *o* pratiquée au centre d'une lame circulaire percée de petits trous qui sert de guide à la tige. Enfin, un ressort à boudin très-faible est interposé entre le tronc de cône et la lame fixe; son élasticité maintient la soupape dans l'ouverture qu'elle doit fermer, aussitôt que l'effort, d'ailleurs très-petit, qui tend à soulever cette soupape cesse de s'exercer.

La soupape Z' de la base du corps de pompe (*fig.* 114) est formée par un tronc de cône en cuir porté par un axe de métal; cet axe se prolonge

au-dessus de la soupape, traverse à frottement dur les rondelles de cuir du piston, et vient finalement passer par un orifice pratiqué dans le couvercle du corps de pompe. Par cette disposition, chaque fois que le piston monte, la soupape Z demeure soulevée ; mais elle l'est à peine de 1 ou 2 millimètres ; car un bourrelet saillant *b*, placé vers le haut de la tige, vient buter contre le couvercle et limite promptement l'ascension de la soupape. Quand le piston redescend, l'ouverture X (*fig.* 117) se trouve presque aussitôt fermée ; et il n'y a pas à craindre de déviation latérale de cette soupape; puisque, en se soulevant, elle reste, en partie, engagée dans l'orifice qu'elle fermait auparavant.

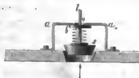


Fig. 116.

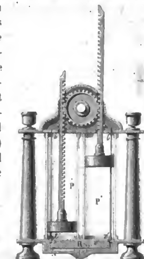


Fig. 114. — Coupe de la machine représentée en perspective fig. 113, par un plan passant par les axes des corps de pompe γγ' Canal secondaire creusé dans le robinet.

202 (*c*). **Robinet.** — Dans la machine ordinaire, le robinet R (*fig.* 117) placé sur le trajet du canal XYX a une triple fonction : 1° il doit permettre à l'opérateur d'établir et de supprimer alternativement la communication entre les corps de pompe et le récipient ; c'est le conduit *ab* traversant, d'outre en outre, le noyau du robinet qui, suivant qu'il est dirigé sur le prolongement de YV ou qu'il lui est perpendiculaire, amène l'un ou l'autre des deux résultats ; 2° il doit à volonté laisser rentrer l'air dans les corps de pompe seulement ; 3° ou bien enfin le faire pénétrer dans le récipient. C'est le conduit secondaire γγ' *recourbé* comme l'indique la figure (116) qui, suivant qu'on

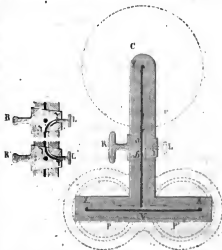


Fig. 117. — Plan de la machine pneumatique ordinaire.

le dirige du côté des corps de pompe ou du côté du récipient, remplit cet office, à la condition pourtant qu'on ait le soin d'enlever, chaque fois, la tige L qui ferme habituellement ce conduit.

203 (*d*). **Éprouvette.** — Il faut que l'opérateur puisse, à une époque quelconque, estimer la force élastique de l'air contenu dans le récipient; on emploie dans ce but un baromètre à siphon, à branches d'égale longueur, qui se trouve logé dans une cloche de verre mise en communication avec le récipient (*fig.* 118). Ce baromètre est fixé à une planchette munie d'une échelle graduée, dont le zéro se trouve au point qu'atteindraient les deux niveaux du mercure, si le vide absolu existait dans le récipient. Dès lors, on a toujours, par la simple addition des nombres inscrits en regard des niveaux dans les deux branches, la pression du gaz confiné qui se trouve exprimée en longueur de colonne mercurielle. Quand la platine est peu élevée, on se contente d'un baromètre tronqué de même forme que le précédent, mais de moindre longueur (*fig.* 113), qui ne fournit des indications, qu'à partir du moment où la pression est inférieure à $\frac{1}{2}$ atmosphère; cela suffit du reste, pour la plupart des expériences.



Fig. 118.

204. **Perfectionnement dû à M. Babinet.** — Avec les meilleures machines pneumatiques, on ne fait guère le vide à moins d'un millimètre de mercure. M. Babinet, par une disposition peu compliquée, amène le gaz du récipient à un degré de raréfaction plus élevé. — Il devient même nécessaire, quand on utilise le perfectionnement qu'il a introduit, de substituer l'acide sulfurique au mercure dans le baromètre tronqué; la grande densité de ce dernier liquide rendant plus difficile une mesure exacte de la pression finale du gaz dans le récipient. — L'idée de M. Babinet est fort simple : quelle est la cause qui limite la raréfaction dans le récipient de la machine ordinaire? C'est, nous le savons, la présence d'une certaine quantité de gaz stationnaire dans l'espace nuisible. Il arrive un moment où ce gaz, qui possède toujours la même force élastique que l'atmosphère quand le piston est au bas de sa course, acquiert la même force élastique que le fluide du récipient quand le piston est au point le plus haut. Dès lors, il ne passe plus rien du récipient au corps de pompe; la limite ordinaire est atteinte.

205. Eh bien, laissons le seul corps de pompe P (*fig.* 119) en communication avec le récipient et servons-nous de l'autre corps de pompe P' pour faire le vide dans l'espace nuisible de P. Dès que cette nouvelle raréfaction aura commencé, le piston de P, en se soulevant, laissera au-dessous de lui, un fluide dont la force élastique finale, moindre que tout à l'heure, puisque l'air

de l'espace nuisible a disparu en partie, sera, par suite, plus faible que dans le récipient. Une nouvelle portion de gaz pourra donc passer du récipient dans le corps de pompe P. Le piston de P, en redescendant, la refoulera dans l'espace nuisible qui lui correspond ; d'où la pompe P′ l'extraira, à son tour, pour la déverser dans l'atmosphère. Le récipient perdra donc ainsi successivement une fraction du gaz qui restait et que la machine ordinaire n'eût pu lui enlever.

206. Limite de raréfaction dans la machine perfectionnée. — Il y aura toutefois une nouvelle limite nécessaire de raréfaction. Car l'espace nuisible de P, jouant par rapport à la pompe pneumatique P′, le rôle de récipient, la force élastique du gaz qui y est contenu ne peut devenir inférieure à $\frac{u}{v}$ H (198). Quand ce degré de vide aura été atteint dans cet espace nuisible, P′ ne lui enlèvera plus aucune trace de gaz, les mouvements du piston ne produiront plus désormais aucun effet utile. Or, si la masse gazeuse stationnaire dans l'espace nuisible u du corps de pompe P a pour pression $\frac{u}{v}$ H au moment où elle est réduite à n'occuper que ce petit espace, lorsque ce piston parviendra au point le plus haut de sa course, la même masse occupant le volume v, devra prendre la force élastique $\frac{u}{v}$ de $\frac{u}{v}$ H ou $\frac{u^2}{v^2}$ H, d'après la loi de Mariotte. Telle sera donc aussi la force élastique finale du gaz dans le récipient, ou la valeur du pouvoir raréfiant de la machine perfectionnée. — Comme $\frac{u}{v}$ est une fraction, $\frac{u^2}{v^2}$ est toujours plus petit que $\frac{u}{v}$.

207. Détails du robinet. — Les figures 115 et 119 font comprendre comment l'idée de M. Babinet a été réalisée dans la pratique. Le robinet R est placé au point de bifurcation du conduit XYX′. Indépendamment du canal ordinaire, il est percé, 1° suivant son axe, d'un nouveau canal D (*fig.* 115) qui permet la communication des deux corps de pompe et du récipient ; 2° d'un conduit incomplet E (*fig.* 119), perpendiculaire à l'axe, qui met en relation le seul corps de pompe P avec C lorsque, faisant tourner le robinet de 90°, on passe de la position (*a*) à la position (*b*). Un canal secondaire α 6 est ménagé dans la masse métallique qui unit les deux corps de pompe ; il sert, quand le robinet occupe la position (*b*) à faire communiquer directement les deux corps de pompe par l'intermédiaire du conduit γ γ′ pratiqué dans l'épaisseur du robinet R parallèlement à E, mais dans un plan différent. La machine fonctionne donc comme machine ordinaire, quand le robinet a la position indiquée par la figure 119 (*a*) ; elle fonctionne comme machine perfectionnée, quand le robinet a tourné de 90° dans le sens de la flèche et qu'il a la position indiquée par la figure 119 (*b*).

Il faut remarquer que, dans l'évaluation de la raréfaction, faite plus

haut (205), nous n'avons pas tenu compte de la capacité du conduit α 6, parce que cette capacité est toujours rendue très-petite.

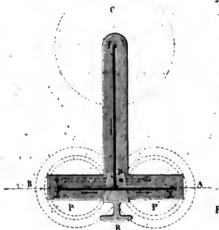


Fig. 115. — Plan de la machine représentée fig. 113 avec le perfectionnement de M. Babinet.



(a)



(b)

Fig. 119. — Coupe de la machine représentée fig. 113 par un plan mené par les axes des corps de pompe.

α6 Canal secondaire creusé dans la masse métallique qui sépare les deux corps de pompe. — R robinet portant le perfectionnement de M. Babinet.

208. **Usages de la machine pneumatique.** — La disposition de la platine de la machine pneumatique permet de faire le vide, soit dans les cloches, soit dans les ballons; pour ce dernier cas, le centre de la platine porte un cylindre creux fileté à sa surface extérieure qui fait suite au tube K (*fig.* 113) et sur lequel on peut visser toute espèce de vases. On peut même faire le vide dans un récipient placé très-loin de la machine; il suffit de recourir à un tube de plomb de longueur convenable qui se vissera d'une part, à l'une des tubulures du récipient et de l'autre au centre de la platine.

Depuis quelques années, les usages de la machine pneumatique se sont étendus à l'industrie; on en tire un parti très-avantageux pour entretenir une raréfaction prolongée dans de vastes récipients; nous parlerons seulement ici de son application aux chemins de fer atmosphériques.

209. Dans les chemins de fer ordinaires, c'est l'adhérence des roues motrices de la locomotive contre les rails, qui, au moment de la rotation de ces roues, détermine le mouvement de translation du convoi. Sur une voie horizontale, cette adhérence est maximum; elle est due au poids total de la locomotive. Au contraire, sur une voie inclinée que le convoi doit gravir, l'adhérence n'est plus produite que par la composante du poids normale à la direction du chemin. On comprend donc qu'elle puisse devenir, dans ce

cas, insuffisante pour mettre des wagons en mouvement. C'est précisément, quand il s'agit de ces pentes exceptionnelles, où les locomotives perdent une grande partie de leur puissance de traction, que le chemin de fer atmosphérique pourrait rendre de grands services. Un de ces chemins était installé, il y a peu de temps encore, dans une étendue d'une lieue, à peu près, sur la ligne de Paris à Saint-Germain. Il permettait aux convois de gravir une pente d'environ 3 centimètres et demi par mètre.

Dans les chemins de fer atmosphériques, un tuyau cylindrique en fonte, d'une assez grande section, est placé, tout le long de la voie, entre les deux rails. (Celui de la ligne de Saint-Germain avait $0^m,65$ de diamètre.) Dans le tuyau, se meut un piston dont la tige recourbée se relie au premier wagon du convoi; cette tige passe dans une fente alternativement ouverte ou fermée qui est pratiquée le long d'une des arêtes du cylindre. Si, dans ces conditions, le vide est fait en avant du piston, la pression atmosphérique qui agit sur sa face postérieure l'obligera à se déplacer d'une manière continue dans le tuyau, et le convoi sera entraîné. La force qui produit la traction n'est nullement modifiée par la grandeur de la pente; elle ne dépend que de la différence des pressions exercées sur les deux faces du piston.

210. Corps de pompe à double effet. — La machine pneumatique destinée à faire le vide dans ce long tuyau et à en extraire de 4 à 5 mètres cubes d'air à la minute, est placée à l'une des extrémités du chemin ; elle se compose de quatre corps de pompe semblables, ayant une hauteur de 2 mètres et un diamètre de $2^m,5$. Les pistons reçoivent leur mouvement d'une machine à vapeur fixe, d'une grande puissance. Ce qui donne un intérêt particulier à cette machine pneumatique de dimensions exceptionnelles, c'est que les pistons, dans chacun de leurs mouvements, produisent le double résultat : 1° d'aspirer l'air du tuyau, 2° d'expulser dans l'atmosphère la masse gazeuse précédemment introduite dans le corps de pompe. La figure théorique (*fig.* 120) que nous donnons ici, fait bien comprendre la possibilité de ce double effet. Quand le piston descend, la soupape a' s'ouvre; et, l'air contenu dans la partie inférieure du corps de pompe est chassé dans l'atmosphère; en même temps, la soupape b s'abaisse, et livre passage à l'air du tube T, qui communique avec le tuyau placé le long de la voie. Pendant ce mouvement du piston, a et b' restent fermées :

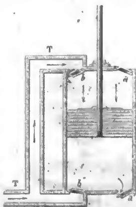


Fig. 120

a par l'effet de la pression extérieure, b' par l'air comprimé au-dessous du piston. De même, quand le piston remonte, a et b' s'ouvrent, a' et b se fer-

ment; l'air du tube T est aspiré dans la partie inférieure du corps de pompe, tandis que l'air accumulé dans la partie supérieure s'échappe dans l'atmosphère.

On fait, dans les cours de physique, une foule d'expériences intéressantes sur la pression atmosphérique, en se servant de la machine pneumatique; nous allons mentionner les plus curieuses. Les principes théoriques déjà développés dispensent de longues explications.



Fig. 121.

211. Crève-vessie. — L'ouverture d'un cylindre de verre (*fig.* 121) est hermétiquement fermée par un fragment de vessie solidement attaché à son pourtour. En raréfiant l'air dans le cylindre, la vessie se creuse et finit par se briser, avec une forte détonation, qui est évidemment due à la rentrée brusque de l'air extérieur dans le cylindre.

212. Hémisphères de Magdebourg. — Deux hémisphères creux en cuivre, H et H′ (*fig.* 122), se juxtaposent exactement et forment par leur réunion une sphère hermétiquement close. Si l'on fait le vide dans leur intérieur, par l'intermédiaire du canal T, et qu'on ferme ensuite le robinet R, il devient très-difficile de séparer les deux hémisphères : la pression de l'air extérieur les maintient fortement appliqués l'un contre l'autre, et l'effort nécessaire pour effectuer cette séparation croit avec leur surface. Otto de Guericke employa, dans une circonstance, des hémisphères dont la base était de quelques décimètres carrés; et huit forts chevaux attelés quatre d'un côté, quatre de l'autre, ne purent parvenir à les séparer. Au contraire, la séparation fut immédiate, quand on ouvrit le robinet R, pour laisser rentrer l'air.

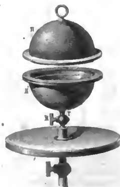


Fig. 122.



Fig. 123.

213. Jet d'eau dans le vide. — Le vide étant fait dans une cloche de verre C, (*fig.* 123) rétrécie par le bas et munie d'un robinet R qui empêche la rentrée de l'air extérieur, il suffit de faire plonger l'appareil, par sa base, dans une cuvette pleine d'eau et d'ouvrir R, pour obtenir un jet continu de

liquide qui va frapper la partie supérieure de la cloche. La pression atmosphérique qui s'exerce à la surface de l'eau de la cuvette est ainsi mise en évidence.

III. — MACHINE ET POMPE DE COMPRESSION

214. Machine ordinaire. — La machine de compression, qui a pour but, comme son nom l'indique, d'augmenter la force élastique de l'air dans un récipient, offre les mêmes parties essentielles que la machine pneumatique; mais les soupapes Z et Z' s'ouvrent en sens inverse (*fig.* 124); en outre, le récipient est maintenu appliqué contre la platine de la machine, par des tringles de fer solidement boulonnées. Le piston est-il au bas de sa course ? On le soulève, Z' reste fermée, Z s'ouvre, et l'air extérieur remplit le corps de pompe P. On baisse le piston: Z' s'ouvre, Z se ferme; et l'air contenu dans le corps de pompe passe dans la cloche C. Cet air, qui occupait le volume v du corps de pompe sous la pression extérieure H, occupera le volume V du récipient sous la pression $\frac{v}{V}$ H. Sa force élastique s'ajoutera à la pression H du gaz qui se trouvait déjà en C (177), et on aura pour force élastique totale dans le récipient, après le premier coup de piston, $H + \frac{v}{V} H$,

Fig. 124.

ou $$H_1 = H\left(\frac{V+v}{V}\right);$$

Le second coup de piston accroîtra H_1 de la même quantité $\frac{v}{V}$ H; on aura par suite :

$$H_2 = H_1 + \frac{v}{V}\,H = H\left(\frac{V+2v}{V}\right);$$

après n coups de piston :

$$H_n = H\left(\frac{V+nv}{V}\right)$$

215. Limite de condensation. — Théoriquement, H_n augmenterait indéfiniment en même temps que n; il n'en est rien dans la pratique, à cause de l'existence de l'espace nuisible.

L'air qui remplit, sous la pression H, le volume v du corps de pompe,

prend, quand il est réduit à n'occuper que l'espace nuisible, la force élastique $\frac{v}{u}$ H. Donc, lorsque l'air comprimé dans le récipient possédera lui-même une pression $\frac{v}{u}$ H, aucune portion de l'air extérieur ne pourra plus pénétrer dans la cloche : la limite de condensation sera atteinte.

216. Pompe de compression. — On emploie rarement la machine de compression dans les expériences de physique ; on se sert, de préférence, de la pompe de compression, instrument beaucoup plus simple, et qui permet d'ailleurs la condensation d'un gaz quelconque dans un récipient donné. Le piston est massif ; la soupape Z (*fig.* 125) d'entrée pour le gaz et la soupape de sortie Z' sont placées l'une et l'autre à la base du corps de pompe ; on fait communiquer, par un tube de plomb, la tubulure T avec le gazomètre plein du

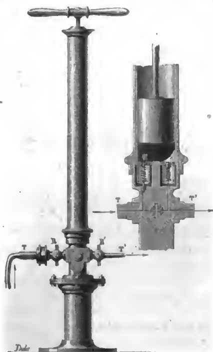


Fig. 125.

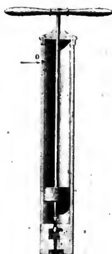


Fig. 126

gaz que l'on veut comprimer ; T' communique, en même temps, avec le récipient où la condensation doit avoir lieu. Quand le piston monte, Z s'ouvre, Z' se ferme, et le corps de pompe se remplit de gaz. Quand il descend, l'inverse a lieu : Z' se ferme, Z s'ouvre, et la masse gazeuse est refoulée dans le récipient. L'appareil que nous venons de décrire peut aussi servir de pompe pneumatique ; T doit aboutir alors au récipient où la *raréfaction* d'un fluide élastique doit être produite, et T' débouche dans l'atmosphère.

On a recours, dans quelques cas, quand il s'agit de condenser l'air, à une pompe plus simple. La soupape Z est supprimée et remplacée par un orifice O (*fig.* 126) pratiqué vers la partie supérieure du corps de pompe; le piston, en montant, fait le vide au-dessous de lui, et aussitôt qu'il a dépassé l'ouverture O, l'air extérieur se précipite dans le corps de pompe et le remplit. En redescendant, le piston refoule cet air, qui fait ouvrir la soupape Z' dans le récipient au-dessus duquel la pompe est habituellement vissée.

217. **Pompes accouplées.** — Quand il est nécessaire de pousser très-loin la compression de l'air, comme dans les expériences de M. Regnault sur la loi de Mariotte et sur la force élastique de la vapeur d'eau, on se sert encore de pompes analogues pour la construction à celles que nous venons de décrire (216) ; mais on accouple ensemble plusieurs de ces appareils. Les tiges des pistons sont montées à des bielles articulées B, B', B'' (*fig.* 127) sur un même axe horizontal de rotation A, muni d'un volant V pour régulariser le mouvement et de manivelles M, M' à chacune de ses extrémités. L'air chassé par les trois pompes arrive tout d'abord, dans un réservoir sphérique en métal S ; et de là, dans le récipient. Du reste, il est difficile, même en employant des pompes parfaitement construites, de comprimer directement l'air, sous des pressions supérieures à 25 ou 30 atmosphères. La chaleur dégagée pendant la compression du gaz, surtout quand on opère sur une masse un peu grande, fait gripper le cuir des pistons et rend bientôt impossible le fonctionnement de la pompe.

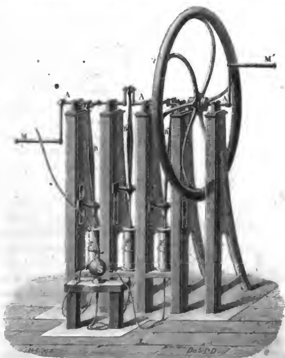


Fig. 127.

218. Quand on veut dépasser cette limite, on peut recourir à la disposition ingénieuse des *pompes en cascades*, imaginée par M. Regnault. L'air puisé par une première pompe dans l'atmosphère, passe, après avoir été comprimé par elle, dans un second corps de pompe de diamètre plus petit. Là, un deuxième piston lui fait subir une compression nouvelle et le refoule dans le récipient. De cette façon, la compression est successive; et la chaleur dégagée chaque fois est en quantité trop faible pour altérer le cuir des pistons.

IV. — VOLUMÉNOMÈTRE

219. **Voluménomètre de M. Regnault.** — Le but du voluménomètre est de mesurer exactement le volume d'un corps de forme quelconque et d'obtenir ensuite, par le rapport du poids au volume, le poids spécifique de la substance qui le constitue, sans recourir à l'immersion dans un liquide.

L'idée de la méthode et sa réalisation expérimentale appartiennent au capitaine Say; M. Regnault a perfectionné la mise en œuvre du procédé.

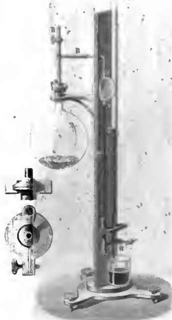


Fig. 128.

Le principe en est d'ailleurs très-simple : Un vase de capacité donnée V, renferme le corps de volume x et une certaine quantité d'air dont le volume est par suite $V - x$, sous la pression H. On rend la capacité du vase égale à $V + v$ et on mesure la nouvelle force élastique $H - h$ de l'air, dont la masse n'a pas changé, mais dont le volume est devenu $V + v - x$. La loi de Mariotte donne alors l'égalité :

$$\frac{V - x}{V + v - x} = \frac{H - h}{H} \qquad (1)$$

d'où l'on tirera la valeur de x.

Voici maintenant les détails pratiques : le corps, — fécule, poudre, etc., — sur lequel on doit opérer, est introduit, après avoir été pesé, dans un ballon de verre surmonté d'un tube à trois branches. Ce ballon communique avec l'atmosphère, par l'intermédiaire d'un appareil de dessiccation qui fait suite à la branche verticale du tube de jonction; la branche horizontale B met le ballon en relation avec le manomètre à air libre que nous avons déjà décrit (189). Le tube T de ce manomètre doit porter un renflement vers

sa partie supérieure (*fig.* 128). On mesure, à l'avance, le volume V du ballon jusqu'au trait α et le volume v de la boule de α en 6. L'expérience a deux phases : 1° le robinet de B étant ouvert, on verse du mercure par le tube T' du manomètre jusqu'à ce que les deux niveaux en T et en T' affleurent en α ; le volume de la masse d'air contenue dans le ballon est à ce moment $V - x$, et sa pression, donnée par le baromètre, est H. On ferme le robinet de B, et par la manœuvre du robinet à trois voies, on fait descendre le niveau du mercure en T, jusqu'au trait 6 ; alors, le volume de l'air ayant augmenté dans le ballon, sa force élastique a diminué, et le niveau en T' se trouve placé au-dessous du plan horizontal passant par 6 ; on mesure au cathétomètre la distance h des deux niveaux. Le volume de la masse gazeuse est cette fois $V + v - x$, et la pression $H - h$; la formule (1) est dès lors applicable.

Quant à v, il s'estime aisément, en pesant le mercure que le robinet à trois voies laisse écouler, quand le niveau baisse dans le tube T de α en 6. V est déterminé indirectement, en effectuant les deux opérations que nous venons d'indiquer, sans introduire dans le ballon aucun corps étranger ; on a alors :

$$\frac{V}{V+v} = \frac{H-h}{H}.$$

d'où l'on peut déduire V.

Si la substance sur laquelle on opère est hygrométrique, on doit faire arriver, dans le ballon, de l'air desséché. Si, au contraire, elle renferme de l'eau de constitution qu'elle perdrait en partie dans une atmosphère sèche, il faut opérer avec l'air ordinaire.

On voit ci-contre (*fig.* 128) les détails de la fermeture exacte du ballon ; le mode suivi est le même que celui qui a été décrit, à propos de la jonction des tubes manométriques, dans l'appareil de M. Regnault, pour la vérification de la loi de Mariotte.

CHAPITRE VII

APPAREILS SERVANT A PRODUIRE LE MOUVEMENT DES LIQUIDES SOUS L'INFLUENCE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE POMPES. — SIPHON

I. — POMPES

220. **Destination générale des pompes.** — Une pompe est un appareil destiné à élever l'eau d'un réservoir inférieur (puits, citerne), etc., dans

un réservoir placé plus haut. Le moteur employé peut être quelconque ; — la force musculaire de l'homme, celle des animaux, le vent, la vapeur, etc.

221. Pompe aspirante, construction. — Exposons la théorie des pompes, en prenant, comme type, l'une d'elles : la pompe aspirante.

Les organes essentiels d'une pompe aspirante sont : un corps de pompe P (*fig.* 129), un piston creusé suivant son axe, un conduit C dit *tuyau d'aspiration*, qui fait communiquer le corps de pompe avec le réservoir inférieur d'où l'eau doit être extraite, deux soupapes Z, Z', disposées comme celles de la machine pneumatique, l'une entre le tuyau d'aspiration et le corps de pompe, l'autre adaptée au piston.

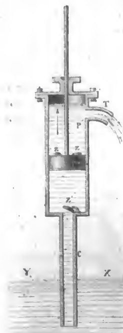


Fig. 129.

222. Jeu de la pompe. — Soulevons le piston qui se trouvait d'abord au bas de sa course ; Z demeure fermée, Z' s'ouvre ; l'air du tuyau d'aspiration se répand, en partie, dans le corps de pompe : son volume augmentant, sa force élastique diminue ; par suite, l'atmosphère qui exerce sa pression, à la surface de l'eau du réservoir, fait monter cette eau, dans le tuyau d'aspiration, jusqu'à un certain point C. Dans tous les cas, la colonne d'eau est soulevée à une hauteur telle que son poids, augmenté de la force élastique de l'air contenu au-dessous du piston, fasse équilibre à la pression atmosphérique.

Le piston redescend ; Z' se ferme, Z s'ouvre ; l'air du corps de pompe se déverse à l'extérieur ; et la colonne d'eau conserve sa hauteur primitive dans le tuyau d'aspiration. En continuant à produire le mouvement alternatif du piston, on voit donc que l'eau, s'élevant de plus en plus dans le tuyau d'aspiration, pourra parvenir dans le corps de pompe. Dès lors, le piston, en redescendant, la fera passer au-dessus de lui : et, en remontant, il l'amènera jusqu'au tuyau de déversement T. Le piston produit donc l'effet utile, pendant son ascension. Quand il descend, l'eau, sans éprouver aucun transport vertical, passe simplement du compartiment inférieur du corps de pompe dans le compartiment supérieur.

223. Conditions auxquelles une pompe doit satisfaire. — 1° La distance qui sépare la base inférieure du piston, du niveau de l'eau dans le puisard doit toujours être moindre que 10^m,33. Ceci est évident de soi ; car nous venons de voir que c'est uniquement l'atmosphère, dont la force élas-

tique est équivalente au poids d'une colonne d'eau de $10^m,33$ de hauteur, qui fait monter l'eau dans le tuyau d'aspiration. — Il faut bien remarquer que la condition qui vient d'être formulée n'entraîne pas, comme conséquence nécessaire, qu'une pompe ne puisse servir à élever l'eau qu'à des hauteurs de 10 mètres au plus; ce liquide peut être porté beaucoup plus haut : il suffit en effet, pour produire ce résultat, de faire passer la tige du piston dans une boîte à étoupes adaptée au couvercle du corps de pompe, et de faire partir du haut de ce dernier, un tuyau vertical muni à sa partie inférieure d'une soupape qui s'ouvre du corps de pompe à l'extérieur. Alors, l'eau soulevée par le piston, s'engage dans ce nouveau canal de conduite ; retenue par la soupape, elle ne retombe pas dans le corps de pompe, quand le piston descend, et elle peut arriver, lorsqu'il monte, à de grandes hauteurs. La pompe aspirante simple est ainsi transformée en une pompe aspirante élévatoire. Le point essentiel, quand il s'agit de faire monter l'eau d'un puits assez profond, c'est de placer le corps de pompe, à une profondeur telle, que la distance de sa partie supérieure au niveau moyen de l'eau soit notablement plus petite que $10^m,33$. Rien n'empêche d'ailleurs, que le piston ne soit surmonté d'une longue tige métallique qui permettra de faire manœuvrer la pompe par un moteur placé à l'ouverture du puits.

224. **Limite de hauteur du tuyau d'aspiration.** — La pratique a indiqué que la hauteur du tuyau d'aspiration doit, pour plus de sûreté, ne pas dépasser 8 ou 9 mètres. La raison de cette limite, beaucoup plus restreinte que ne l'indique la théorie, est facile à expliquer. Il existe toujours des fuites inévitables d'eau et d'air entre le piston et le corps de pompe; en outre, l'air dissous par l'eau aérée du puisard se dégage subitement dans la pompe, quand cette eau se trouve au contact d'un milieu raréfié ; il vient former une espèce de coussin élastique au-dessous du piston et contre-balance ainsi, en partie, la pression de l'air extérieur.

Ce n'est pas tout : l'influence de l'espace nuisible se fait encore ici sentir : l'air contenu dans cet espace u, quand le piston est au bas de sa course, a pour force élastique H, H exprimant, en colonne d'eau, la valeur de la pression atmosphérique. Quand le piston est au point le plus haut, cette même masse de gaz a pour force élastique $\frac{u}{v}$ H, v étant le volume du corps de pompe; or, si à ce moment, il ne passe plus d'air du tuyau d'aspiration, de hauteur h, dans le corps de pompe (la colonne d'eau arrivant juste à la soupape Z'), nous aurons comme condition d'équilibre :

$$\frac{u}{v} H + h = H.$$

A partir de là, l'eau ne pourra plus s'élever davantage ; le jeu alternatif du piston n'aura d'autre effet que de faire varier la pression de l'air du

corps de pompe, depuis H jusqu'à $\frac{u}{v}$ H. On tire de l'égalité précédente :

$$h = H\left(1 - \frac{u}{v}\right) \quad \text{ou} \quad h = H\,\frac{v-u}{v}.$$

Voici donc une limite nouvelle de hauteur que le tuyau d'aspiration ne saurait dépasser. Cette hauteur dépend des volumes relatifs de l'espace nuisible et du corps de pompe, elle doit être toujours moindre que $\frac{v-u}{v}$ H. Si $u = \frac{1}{4}\,v$, la limite de hauteur pour le tuyau d'aspiration est égale aux $\frac{3}{4}$ de $10^m,33 = 7^m,74$.

225. Mesure de l'effort nécessaire à la manœuvre de la pompe. — La pompe est en pleine activité : le piston, chaque fois qu'il monte, amène dans le réservoir supérieur, un volume d'eau égal à celui du corps de pompe, et l'effort à exercer pour le soulever est égal à la résultante des forces qui agissent sur ses deux bases. Or, la force qui agit de haut en bas, c'est le poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section B du piston et pour hauteur la distance h de ce piston, au niveau supérieur du liquide ; distance qu'il faut augmenter de $10^m,33$, car la pression atmosphérique est évidemment transmise au piston, par l'intermédiaire du liquide. De même, la force agissant de bas en haut, est égale au poids d'une colonne d'eau de même section dont la hauteur serait $10^m,33$, moins h' distance du piston au niveau dans le réservoir inférieur (*). La résultante sera égale à la différence des deux forces ou B $(10,33 + h - 10,33 + h')$ ou B $(h + h')$, en prenant le poids spécifique de l'eau égal à 1. Ainsi, l'effort à vaincre est représenté par le poids de la colonne d'eau comprise entre les niveaux, dans les réservoirs inférieur et supérieur.

226. Évaluation du travail. — Si l'on fait abstraction des frottements, des chocs, etc., en un mot, de toutes les résistances passives, on voit que le travail utile est égal au travail moteur. En effet, appelons h_1, la course du piston, dans le corps de pompe, le travail moteur est égal au produit de la force B$(h + h')$ par le chemin parcouru h_1, ou B $(h + h')\,h_1$, puisque la force agit dans la direction du chemin. D'autre part, le travail utile consiste en un poids d'eau dont le volume est égal au volume du corps de pompe Bh_1, élevé à une hauteur $h + h'$; il a donc pour expression Bh_1 $(h + h')$; produit identique au précédent. Dans la pratique, on est bien loin d'obtenir un

(*) Pour comprendre ce dernier résultat, il suffit de remarquer que la pression de l'atmosphère, sur la base inférieure du piston, est la même que celle qu'exercerait une colonne d'eau ayant $10^m,33$ au-dessus du niveau dans le puisard et qui serait contenue dans un tube vertical, communiquant par le bas avec le tuyau d'aspiration de la pompe, et s'ouvrant à sa partie supérieure dans un espace vide d'air. Or, dans ce système de vases communiquants, la pression sur un élément contenu dans le plan horizontal qui passe par la base du piston est évidemment égale à $10^m,33 - h'$.

pareil résultat; les fuites d'eau entre le piston et le corps de pompe, les changements brusques de direction et de section de la colonne liquide qui s'élève dans l'appareil, la vitesse qu'elle possède, au moment où elle se déverse dans le réservoir supérieur, vitesse qui lui permettrait d'effectuer encore un certain travail, sont autant de causes qui diminuent le travail utile. Le rendement ne dépasse guère 0,65 avec les meilleures pompes, et il peut descendre à 0,30 et à 0,20 dans les pompes communes.

227. Écoulement continu. — L'écoulement du liquide par le conduit de sortie, de la pompe aspirante simple et de la pompe aspirante élévatoire, est nécessairement intermittent. Il se produit, pendant l'ascension du piston, et n'a plus lieu, pendant sa descente. On obvie à cet inconvénient, qui peut être grave dans quelques cas (par exemple, pour les pompes à incendie), en plaçant sur le trajet de la colonne liquide un réservoir plein d'air R (*fig.* 130). Les tuyaux d'entrée et de sortie de l'eau y sont disposés comme l'indique la figure 138. Chaque fois que le liquide pénètre dans le réservoir R, il comprime l'air qui s'y trouve, dans l'espace annulaire compris entre le tuyau V et les parois du réservoir, et il sort moins d'eau par le tuyau de conduite, qu'il n'en arrive, pendant le même temps, dans le réservoir; quand le piston n'injecte plus d'eau dans R, la force élastique de l'air comprimé continue à faire monter l'eau dans le conduit de déversement, et l'écoulement ne s'arrête pas.



Fig. 130.

Nous venons d'exposer tout ce qui se rapporte à la physique dans la théorie des pompes. Ce serait sortir des limites de ce cours que de donner des détails très-complets sur leur construction. Nous dirons quelques mots seulement des pistons et des soupapes.



Fig. 131.

228 (*a*). Pistons. — Les pistons sont analogues à ceux de la machine pneumatique et de la pompe de compression : ce sont, le plus souvent (*fig.* 131), des cylindres formés par des rondelles de cuir imprégnées de matière grasse et fortement comprimées, entre deux disques de métal, qu'un écrou permet de rapprocher plus ou moins. Par ce moyen, les rondelles tendent à former un bourrelet, à la surface extérieure du piston, et celui-ci se juxtapose parfaitement à la paroi du corps de pompe. Toute communication est par suite supprimée entre les deux portions du cylindre que le piston doit séparer. Dans les pompes communes, on se contente souvent d'enrouler une corde de chanvre ou des étoupes sur un noyau métallique compris entre les deux disques (*fig.* 132). Le piston



Fig. 132.

fonctionne encore bien dans ces conditions, mais l'usure est plus prompte.

228 (*b*). **Soupapes.** — Les soupapes sont des cloisons mobiles dont le rôle est d'établir et de supprimer alternativement la communication, entre deux compartiments voisins. On en distingue de plusieurs espèces : 1° les *soupapes à clapet;* elles sont souvent formées de deux disques métalliques comprenant entre eux une lame de cuir un peu plus large que l'ouverture à fermer: Ce petit système est mobile autour d'une charnière. La soupape à clapet est simple (*fig.* 133) ou double (*fig.* 134); 2° les *soupapes coniques :*



Fig. 133



Fig. 134.

nous les avons déjà vues employées dans les appareils propres à raréfier et à comprimer les gaz; elles consistent en un tronc de cône *s* (*fig.* 135), dont le noyau métallique recouvert de cuir se prolonge sous forme d'une tige déliée. Celle-ci va s'engager dans un orifice *o* servant de guide, et comme elle est munie d'un arrêt en *b*, la course de la soupape se trouve limitée par la rencontre de cet arrêt avec le disque fixe *a*.



Fig. 135.

229. **Pompe foulante.** — La pompe foulante a son corps de pompe P (*fig.* 136) en partie immergé, et son piston massif. Le tuyau de conduite T s'adapte à la partie latérale et inférieure de ce corps de pompe, et porte au point de jonction une soupape Z qui s'ouvre de dedans en dehors. Une autre soupape Z' s'ouvrant de bas en haut, est placée à la base même du corps de pompe. Le jeu de la pompe foulante se comprend de lui-même. Quand le piston monte, l'eau remplit le corps de pompe; quand il descend, cette eau est refoulée dans le tuyau de dégorgement, où elle est ensuite maintenue par la soupape Z.

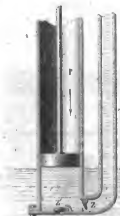


Fig. 136.

230. **Pompe aspirante et foulante.** — Dans la pompe aspirante et foulante, les deux modes précédents sont adoptés. Il y a un tuyau d'aspiration C (*fig.* 137), et un piston massif M; le tuyau de dégorgement est à la base du corps de pompe, de façon que, pendant l'ascension du piston, le corps de pompe se remplit, et, pendant qu'il descend, l'eau est refoulée dans le conduit latéral.

231. Pompe à incendie. — La pompe à incendie est constituée par l'accouplement de deux pompes foulantes jumelles P et P' (*fig.* 138) qui chassent l'eau, dans un réservoir d'air R, où elle est reprise par un tuyau en cuir d'une grande longueur. Les tiges des pistons des deux pompes s'articulent à un même levier de fer L tournant autour d'un axe

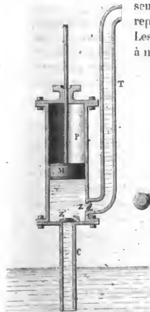


Fig. 137.

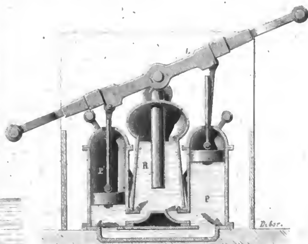


Fig. 138.

horizontal A et manœuvré par un nombre d'hommes suffisant. Les pistons font, au même instant, des mouvements de sens inverse. Quand l'un descend, l'autre monte, de manière qu'il y a, sans cesse, de l'eau injectée dans le réservoir d'air. Le jet de liquide s'échappe alors d'une manière continue et avec une grande vitesse, à l'extrémité de la flèche métallique qui termine le tuyau de cuir. La bache dans laquelle plongent les deux pompes jumelles doit être constamment entretenue pleine d'eau.

II. — SIPHON

232. Théorie du siphon. — Le siphon, instrument destiné au transvasement des liquides, est habituellement constitué par un tube de verre ou de métal recourbé, et à branches inégales. On le dit amorcé, lorsqu'il est entièrement plein du liquide dont il doit provoquer l'écoulement continu.

Supposons cette condition réalisée et donnons au siphon la position indiquée par la figure 139 : la petite branche plonge dans le vase A en partie plein d'eau, et la grande, dans le vase B contenant une portion du même

liquide. Examinons d'abord, si l'eau doit se mettre en mouvement; puis, dans quel sens le mouvement doit avoir lieu. L'atmosphère exerce sa pression à la surface du liquide en A et en B, et, à cause de la faible distance des deux niveaux, nous pouvons admettre que cette pression est la même. Par suite, la colonne liquide contenue dans le siphon conservera une continuité parfaite, elle ne pourra se diviser; car, si une séparation avait lieu, le vide existerait et la pression atmosphérique ferait aussitôt monter le liquide pour la faire disparaître. (On suppose, bien entendu, que la hauteur du siphon est moindre que 10m,33, quand il doit transvaser l'eau; que 0m,76, quand il doit transvaser du mercure, etc.)

La colonne liquide contenue dans le siphon ne peut donc, quelle que soit sa forme, se partager d'elle-même, sous l'influence de la pesanteur, en deux tronçons, comme elle le ferait, si l'appareil était placé dans le vide. Le rôle essentiel de la pression atmosphérique, dans ce cas, est de maintenir une solidarité parfaite, dans l'intérieur du tube, entre les diverses molécules liquides qui y sont contenues. Ceci bien compris, on voit de suite que la colonne liquide doit se mettre en mouvement du côté où l'action qui la sollicite est le plus forte. Or, la force qui tend à le faire descendre du côté de A, est proportionnelle à la hauteur verticale *h* de la petite branche au-dessus du niveau dans le vase supérieur; du côté de B, la force agissant de haut en bas est encore proportionnelle à la hauteur verticale H de la longue branche au-dessus du niveau dans B. Cette dernière force est la plus grande, tant que le niveau de B est inférieur à celui de A; donc le mouvement de la colonne liquide se déterminera vers le vase B, sous l'action d'une force proportionnelle à $(H-h)$, distance des niveaux dans les deux vases A et B.

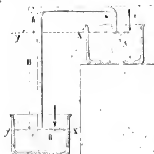


Fig. 139

L'écoulement, une fois commencé, se continuera, jusqu'à ce que le vase A soit vide, puisque toute discontinuité dans la colonne est impossible. Si $H-h$ est nul, c'est-à-dire si les niveaux dans les deux vases sont sur le même plan horizontal, l'écoulement s'arrête. Du reste, la théorie ne suppose nullement la présence de l'eau dans le vase B; le phénomène sera le même, si la grande branche du siphon s'ouvre dans l'air, pourvu que l'orifice de sortie du liquide soit au-dessous du niveau dans le vase A.

233. **Manière d'amorcer un siphon.** — Lorsque le liquide à transvaser est de l'eau, on peut amorcer le siphon en faisant plonger la petite branche dans le vase A et aspirant l'air, avec la bouche, par l'extrémité de la grande branche. Quand il s'agit d'un liquide ou vénéneux ou corrosif, on se sert

d'un siphon (*fig.* 140) dont la grande branche porte, soudé à sa partie inférieure, un tube latéral qui se relève ensuite parallèlement à sa direction. Pour amorcer un pareil instrument, on fait plonger la petite branche dans le vase supérieur, on ferme l'extrémité de la grande branche et on aspire l'air par le tube latéral. Aussitôt que le liquide remplit la grande branche, on cesse d'aspirer, on débouche cette dernière, et le siphon est amorcé.



Fig. 140.

234. On peut encore, quand il s'agit des acides concentrés du commerce, de l'acide sulfurique, par exemple, se servir d'un siphon de plomb dont le sommet porte un entonnoir que l'on ferme à volonté; la longue branche est munie à son extrémité inférieure d'un robinet. L'entonnoir étant ouvert et le robinet fermé, on commence par remplir la grande branche d'acide, et on fait plonger la petite branche dans le liquide à transvaser; puis on ouvre le robinet. Le liquide, en s'écoulant par l'extrémité inférieure de la grande branche, raréfie l'air de la petite: la pression atmosphérique fait monter l'acide dans cette dernière, et pourvu que la raréfaction de l'air intérieur soit suffisante, le siphon s'amorce de lui-même. On peut se poser comme problème de déterminer quelles doivent être les dimensions relatives des diverses parties du siphon pour que l'amorcement se produise spontanément, dans ces conditions. Ce problème trouvera sa place dans le recueil de questions de physique, que nous placerons à la fin du cours.

235. **Vase de Tantale.** — La disposition, dite du *vase de Tantale* (*fig.* 141), dans laquelle la grande branche d'un siphon S est fixée dans la tubulure inférieure d'un vase, permet de produire aisément un écoulement intermittent de liquide. Le vase V reçoit de l'eau, par l'intermédiaire du robinet R; aussitôt que le niveau du liquide dans ce vase atteint le sommet du siphon, l'amorcement se produit de lui-même. Dès lors, le vase se videra promptement, toutes les fois que le siphon laissera échapper plus d'eau que le robinet n'en saurait fournir, et l'écoulement s'arrêtera de lui-même; mais si le robinet continue à donner de l'eau, le vase V se remplira de nouveau; le siphon s'amorcera pour la seconde fois, et l'on voit que, finalement, l'écoulement doit avoir lieu d'une manière intermittente.

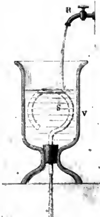


Fig. 141.

LIVRE TROISIÈME

CHALEUR

236. Les phénomènes produits dans les corps, par l'intervention de la chaleur, se rangent dans trois catégories : 1° Changements de volume : *dilatations* et *contractions ;* 2° changements d'état : *passage de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état gazeux*, et inversement ; 3° transmission de la chaleur d'un corps à un autre, à travers l'espace qui les sépare, ou *rayonnement*.

Mais, avant d'aborder l'étude détaillée des faits qui se rapportent à cet agent, il est indispensable d'avoir une idée nette de ce qu'on nomme *température* et de connaître la construction et l'emploi de l'instrument essentiel dans l'étude des phénomènes calorifiques, de l'instrument qui sert à mesurer les *températures*, nous voulons parler du thermomètre.

CHAPITRE PREMIER

THERMOMÉTRIE

237. **Faits d'expérience servant de point de départ.** — Tous les corps soumis à l'action croissante de la chaleur se dilatent ; leur augmentation de volume peut être rendue sensible, à l'aide d'expériences très-simples.



Fig. 142.

1° S'agit-il des corps solides ? Une barre métallique A est engagée entre deux talons fixes T et T' (*fig.* 142), et remplit exactement l'intervalle qui les sépare. Portez-la dans un foyer de chaleur, et lorsqu'elle sera devenue incandescente, tâchez de la replacer dans sa position primitive, vous ne pourrez la faire pénétrer entre les mêmes arrêts. Donc, la barre de métal, en s'échauffant,

s'est dilatée ; vous constaterez en outre que, par le refroidissement, elle se contracte et finit par reprendre, dans le milieu primitif, son volume initial.

2° S'agit-il des corps liquides ? On introduit un liquide coloré dans un ballon B surmonté d'un long col à diamètre étroit (*fig.* 143), de telle manière qu'il en remplisse la capacité jusqu'au trait *m'*, quand le ballon est lui-même plongé dans l'eau froide. Vient-on à plonger brusquement le ballon dans l'eau bouillante ? on voit la colonne liquide, qui se déprime tout d'abord, à cause de la dilatation de l'enveloppe, s'allonger peu à peu dans le col de *m'* vers *m* et atteindre même l'ouverture supérieure. Cette expérience établit quatre faits importants : 1° Qu'un liquide se dilate quand on le chauffe ; 2° que le vase qui forme le ballon augmente de capacité par la chaleur, puisque dès les premiers moments de l'expérience, quand le vase était seul échauffé, le niveau du liquide avait baissé ; 3° que la dilatation du liquide l'emporte sur celle du vase, puisque le liquide s'élève au-dessus de son niveau primitif quand la chaleur pénètre jusqu'à lui ; 4° enfin, on reconnaît que le liquide reprend, de lui-même, son volume initial, quand on reporte le ballon dans le bain d'eau froide où il avait été plongé tout d'abord.

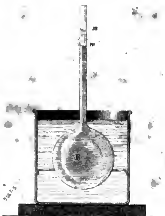


Fig. 143.

3° Pour prouver la dilatabilité des gaz par la chaleur, il suffit d'introduire dans un ballon de verre muni d'un tube d'un diamètre étroit, un gaz quelconque et de le séparer de l'air extérieur par une bulle de mercure *a* (*fig.* 144). On reconnaît qu'il suffit de chauffer ce ballon avec la main, pour voir l'index se mettre en mouvement, d'une manière rapide, vers l'ouverture du tube et indiquer ainsi l'augmentation de volume de la masse gazeuse. Comme dans les expériences précédentes, l'index reprend sa place primitive quand la source de chaleur est éloignée.



Fig. 144.

238. **Température.** — Ajoutons aux faits précédents, qui prouvent que le phénomène de dilatation dû à l'influence de la chaleur est général, cet autre fait qu'indique l'observation : lorsque dans une enceinte sont placés à une petite distance les uns des autres, plusieurs corps inégalement chauds (et nous les jugeons tels par la sensation qu'ils produisent quand nous les touchons successivement, quoique ce moyen d'appréciation soit très-

grossier), les corps les plus chauds se contractent, en même temps qu'ils se refroidissent, les corps les moins chauds se dilatent, en même temps qu'ils s'échauffent ; il arrive un moment où chaque corps prend un volume définitif qui ne change plus, en même temps que son état calorifique paraît demeurer invariable. C'est cet état d'équilibre qui constitue la *température* finale de l'enceinte. Mesurez le volume actuel de l'un des corps et portez-le dans une seconde enceinte ; si, au moment de l'équilibre, il y acquiert le même volume définitif que tout à l'heure, vous direz que *la température de la seconde enceinte est égale à la température de la première.*

239. **Thermomètre. Son principe.** — Placez le même corps dans une série d'enceintes successives dont la température, fixe pour chacune, puisse être reproduite à volonté; notez chaque fois le volume final du corps, et vous aurez un appareil propre à vous renseigner par la grandeur de son volume sur la température inconnue d'une enceinte nouvelle ; vous aurez construit un thermomètre. Ce n'est pas là, à coup sûr, le seul moyen de mesurer les températures ; tout phénomène, produit par la chaleur dans les corps et susceptible d'évaluation numérique, pourrait, à la rigueur, être utilisé dans le même but ; mais c'est le plus commode et, par suite, le plus fréquemment employé.

240. **Choix de la substance thermométrique.** — On a recours de préférence aux liquides, pour la construction des thermomètres usuels. Voici les motifs de ce choix : les solides ont une dilatation faible, mais cet inconvénient est minime : on peut toujours, par des dispositions mécaniques très-simples, rendre appréciables à l'œil les moindres variations de longueur d'un fil ou d'une barre métallique. Les solides ont même un avantage sur les liquides, c'est une plus grande promptitude dans leurs indications ; il leur faut moins de chaleur pour éprouver la même variation de température. (Voir le chapitre : *Des chaleurs spécifiques.*) L'inconvénient réel que présente leur emploi, c'est que leur constitution moléculaire pouvant varier aisément, le thermomètre qu'ils fournissent n'est pas toujours comparable à lui-même. La substance qui le forme ne reprend pas toujours exactement le même volume quand elle revient à la même température.

241. Les gaz présentent la substance thermométrique par excellence. Leur grande dilatation rend négligeable l'influence perturbatrice due à la variation de volume de l'enveloppe solide, qui les renferme. (L'air se dilate environ 160 fois plus que le verre.) La cohésion est très-faible entre les molécules, par suite leur dilatation dépend, à peu près uniquement, des quantités de chaleur introduites dans leur masse, et leurs indications doivent beaucoup se rapprocher de celles du thermomètre *normal* dans lequel, à des additions égales de chaleur, correspondraient rigoureusement des changements égaux dans le volume. Mais, comme le volume d'un gaz dépend, à la fois, de la pression et de la température, l'emploi des thermomètres à

gaz exigerait qu'on consultât, chaque fois, le baromètre, et qu'on s'entourât des plus grandes précautions, pour éliminer les causes d'erreur tenant à la grande sensibilité de l'appareil. Il faut donc laisser le thermomètre à air aux physiciens pour les expériences de grande précision, et recourir définitivement aux liquides, pour la construction des thermomètres le plus fréquemment employés.

242. Choix à faire parmi les liquides. — Parmi les liquides, c'est le mercure qui satisfait le mieux aux conditions exigées.

1° Il est très-facile de l'obtenir chimiquement pur et d'avoir par suite, dans tous les instruments destinés à mesurer des températures, une substance identique à elle-même. Il suffit, pour arriver à ce degré de pureté, de distiller d'abord le mercure, pour le débarrasser des métaux plus fixes que lui, puis de le laisser plusieurs jours en contact avec une dissolution de nitrate acide de mercure, qui s'empare des métaux plus oxydables. On lave ensuite avec soin à l'eau distillée, et on fait disparaître, en chauffant, les dernières traces d'humidité.

2° Sa dilatation est suffisamment régulière ; car le thermomètre à mercure marche sensiblement d'accord avec le thermomètre à air, dans une assez grande étendue de l'échelle des températures.

3° Sa capacité calorifique est très-faible, c'est-à-dire qu'il lui faut, sous le même poids, moins de chaleur qu'aux autres liquides, pour que sa température s'élève de la même quantité. Le thermomètre à mercure pourra donc se mettre rapidement en équilibre de température avec le milieu dans lequel il sera plongé.

Le seul défaut du mercure, c'est la petitesse de sa dilatation, qui est 7 fois plus grande seulement que celle du verre ; mais on obvie à cet inconvénient, en donnant une forme convenable au réservoir thermométrique.

L'alcool et le sulfure de carbone ont été aussi employés comme substances thermométriques ; mais ces liquides sont surtout destinés à la mesure des basses températures.

243. Réservoir et tube du thermomètre à mercure. — On choisit un tube capillaire en cristal, dont la capacité intérieure soit cylindrique. On peut savoir si cette condition est réalisée, en prenant dans les différentes régions du tube la longueur d'une même bulle de mercure qu'on y fait circuler. Cette bulle offrira partout une longueur égale, si la section est la même en tous les points. Ce tube étant bien débarrassé, par des lavages préalables, de toutes les poussières minérales et organiques que l'air a pu y déposer, on souffle à l'une de ses extrémités, dans la masse même du cristal, un réservoir cylindrique ou sphérique *a*, et à l'autre bout, une olive terminée en pointe *b* (*fig.* 145). La masse mercurielle qui doit se dilater sera logée principalement dans le réservoir ; la partie provenant de sa dilatation, dans le tube capillaire. Par ce moyen, malgré la faible dilatabilité

du mercure, la portion de liquide qui représente l'accroissement de volume se trouvant contenue dans un vase de section très-petite, est rendue manifeste à l'œil de l'observateur, par une variation notable de la longueur de la colonne liquide dans le tube.

244. Construction. — Pour remplir l'instrument, on commence par chauffer, avec une lampe à alcool, le réservoir et l'olive; l'air qui s'y trouve se dilate et s'échappe en partie par la pointe effilée. On plonge alors cette dernière dans une cuvette de mercure (*fig.* 146); l'air se refroidit, se contracte et la pression atmosphérique fait monter le mercure dans l'ampoule. Quand celle-ci est en partie pleine de liquide, on redresse le thermomètre et on laisse le réservoir se refroidir; la pression de l'air fait alors tomber, goutte à goutte, une portion du mercure de l'olive dans le réservoir. On peut ainsi, après deux ou trois opérations du même genre, remplir le réservoir aux deux tiers environ. Parvenu à ce point, on dépose le thermomètre sur une grille de fer inclinée de 30° sur l'horizon (*fig.* 147), et, à l'aide de charbons allumés, qui doivent entourer l'instrument sans le toucher, on produit à la fois l'ébullition du mercure dans le réservoir, dans le tube capillaire et dans l'olive; on la maintient quelques instants, pour que la vapeur mercurielle chasse l'air et prenne sa place; puis on redresse brusquement le thermomètre. Cette fois, à la suite de la condensation de la vapeur du mercure, le réservoir et le tube se remplissent complétement. On s'assure par un examen attentif qu'il ne reste plus trace de bulles d'air; s'il en était autrement, il faudrait



Fig. 145.

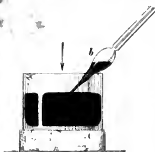


Fig. 146.

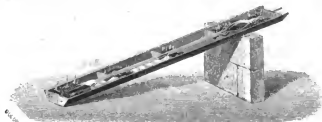


Fig. 147.

recourir de nouveau à l'ébullition du mercure. Le thermomètre s'étant refroidi, on détache l'ampoule par un trait de lime; on chauffe convena-

blement le réservoir, pour faire sortir tout l'excédant du mercure, et dès que le tube se trouve rempli par le liquide dilaté, à la température la plus haute qu'il est destiné à mesurer, on ferme son extrémité à la lampe d'émailleur. De cette façon, le mercure en se contractant, laissera le vide au-dessus de lui dans le tube capillaire.

245. **Graduation du thermomètre.** — On choisit comme températures *fixes* servant de point de repère pour la graduation du thermomètre, celle de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante, sous la pression de $0^m,760$. L'instrument est d'abord plongé dans la glace grossièrement concassée et contenue dans un vase qui est percé de trous *m*, pour que l'eau provenant de la fusion puisse s'écouler librement (*fig.* 148). Au point où le niveau du mercure demeure stationnaire, on marque 0°.

On porte ensuite le thermomètre dans l'appareil figuré ci-contre (*fig.* 149).

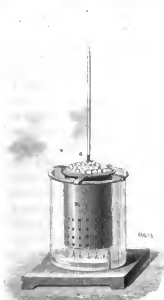


Fig. 148.

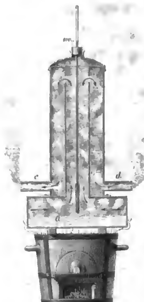


Fig. 149.

C'est un large cylindre *a* en cuivre ou en fer-blanc, contenant de l'eau distillée qui ne s'élève qu'à 4 ou 5 centimètres au-dessus du fond. Le cylindre est surmonté d'un manchon central, dans lequel s'élèvera d'abord la vapeur d'eau, puis d'une enveloppe où cette même vapeur circulera dans le sens indiqué par les flèches, avant de s'échapper à l'extérieur par les tubes *c* et *d*. De cette manière le thermomètre plongé dans la vapeur en

prendra la vraie température; le refroidissement que pourrait occasionner l'air extérieur se trouve empêché par le courant de vapeur qui passe entre le manchon central et son enveloppe. Au point où la colonne mercurielle demeure stationnaire, on marque 100; et on divise l'intervalle, compris entre 0 et 100, en 100 parties d'égale capacité qui correspondent à des longueurs égales, si le tube est cylindrique. Ces divisions, appelées degrés, sont ensuite prolongées au-dessous de 0 et au-dessus de 100. Pour abréger le langage et la lecture, les degrés, comptés au-dessous de 0, sont affectés du signe —; ainsi — 3° veut dire 3° au-dessous de zéro.

On adapte quelquefois, à l'une des tubulures *c* ou *d*, un manomètre à air libre contenant une petite colonne d'eau et qui indique si la pression de la vapeur est égale à la pression extérieure. Mais cette égalité a toujours lieu, et le manomètre est dès lors inutile, quand les tubes par lesquels la vapeur s'échappe ont une large section.

246. Toutefois, on ne doit marquer 100 au point ou le mercure s'arrête dans la vapeur d'eau bouillante que si le baromètre indique une pression de l'air extérieur, égale à $0^m,76$. En est-il autrement? Une correction devient nécessaire; on l'effectue en partant de ce principe : que dans le cas où la hauteur barométrique diffère peu de $0^m,76$, il y a, pour $26^{mm},7$ de variation dans la pression, 1° de différence dans la température. Il est donc facile de marquer le degré voulu sur la tige du thermomètre, au point d'affleurement du mercure; mais, cette correction n'est qu'approchée. Nous apprendrons plus tard à l'effectuer avec toute la rigueur désirable.

247. **Unité de température.** — Par le mode de graduation adopté, on voit que l'unité, choisie pour mesurer les températures ou le *degré centigrade*, doit être défini ainsi : *C'est l'accroissement de température capable de faire dilater, dans le verre, une masse mercurielle de la* 100me *partie de l'augmentation apparente de volume qu'elle subit, quand on la fait passer de la température de la glace fondante à la température de la vapeur d'eau bouillante, sous la pression de* $0^m,76$.

248. **Comparabilité des thermomètres à mercure.** — Il est très-important de savoir, si les différents thermomètres à mercure construits, comme nous venons de l'indiquer, sont comparables entre eux; c'est-à-dire si, placés dans un même bain, ils marqueront tous le même nombre de degrés. Il en est évidemment ainsi pour les points fixes 0° et 100°; quant aux autres, la question est plus complexe. Qu'on fasse abstraction de la dilatation de l'enveloppe, la comparabilité est certaine; il suffit en effet de remarquer que, si le volume du réservoir d'un thermomètre est triple, par exemple, de celui d'un autre thermomètre, la dilatation totale de la masse mercurielle qui y est contenue, quand elle passera de 0° à 100°, sera aussi trois fois plus grande dans le premier, et le degré centigrade y correspondra à une capacité triple dans le tube. Si maintenant les deux ther-

momètres sont portés à la température de 20°, par exemple, l'accroissement de volume du mercure dans cet intervalle de 20° sera trois fois plus grand dans le premier thermomètre que dans le second ; mais, comme le degré y correspond en même temps à une capacité triple, le nombre de degrés marqué par chaque appareil sera le même. Nous verrons plus loin que la comparabilité existe encore, malgré la dilatation de l'enveloppe, pourvu que les verres employés à la construction des enveloppes des divers thermomètres aient le même coefficient de dilatation.

249. **Différentes échelles thermométriques.** — La graduation précédemment indiquée est dite *graduation centigrade*. Réaumur inscrivait 80° là où nous mettons 100°, et divisait l'intervalle en 80 parties égales, de sorte que 100 degrés centigrades en valent 80 Réaumur, ou 1° centigrade $\frac{8}{10} = \frac{4}{5}$ de degré Réaumur. Il faudra donc multiplier le nombre de degrés centigrades par $\frac{4}{5}$ pour avoir le nombre correspondant de degrés Réaumur, et réciproquement l'indication Réaumur par $\frac{5}{4}$ pour avoir l'indication centigrade équivalente. — Le thermomètre employé en Angleterre, auquel on a donné le nom de *Fahrenheit*, porte 32° au niveau du mercure dans la glace fondante et 212° dans la vapeur d'eau bouillante, de sorte que 100° centigrades valent 180° Fahrenheit, ou 1° centigrade $\frac{18}{10} = \frac{9}{5}$ de degré Fahrenheit. Pour passer de l'échelle centigrade à l'échelle Fahrenheit et réciproquement, le calcul sera fait de la manière suivante : au-dessus de 0° on multipliera le nombre de degrés centigrades par $\frac{9}{5}$, et on ajoutera 32. Pour exécuter l'opération inverse, on retranchera 32, et on multipliera le reste par $\frac{5}{9}$. En général, pour effectuer ce genre de transformation, il suffira de traduire en nombres l'égalité $N_c = (N_f - 32)\frac{5}{9}$, dans laquelle N_c représente l'indication centigrade, et N_f l'indication Fahrenheit ; mais il faudra avoir soin d'affecter N_c et N_f du signe + ou du signe —, suivant que les degrés sont comptés au-dessus ou au-dessous du zéro de l'échelle de température.

250. **Sensibilité des thermomètres.** — On peut distinguer deux sortes de sensibilité : l'une consiste dans la promptitude des indications ; pour l'obtenir, il faut donner au réservoir une surface extérieure aussi étendue que possible et employer en même temps une faible masse de mercure. L'autre dépend du déplacement de l'extrémité de la colonne liquide dans la tige. Il est clair qu'on pourra évaluer, avec précision, une fraction de degré d'autant plus faible, que ce déplacement sera plus grand, pour une même variation de température. Pour réaliser cette autre espèce de sen-

sibilité, il faudrait augmenter la masse du mercure dans le réservoir, et la première espèce de sensibilité en souffrirait; on peut, toutefois, satisfaire aux deux conditions, en rendant aussi petit que possible le diamètre intérieur du tube capillaire. Au reste, la sensibilité de l'instrument devra être réglée, selon l'usage auquel on le destine.

251. **Thermomètre à alcool.** — Le thermomètre à mercure est souvent remplacé, pour les observations usuelles, par le thermomètre à alcool; comme ce dernier liquide se dilate plus que le mercure, il n'est pas nécessaire de choisir des tubes aussi fins pour former l'enveloppe du thermomètre. Néanmoins, afin de distinguer plus facilement l'extrémité de la colonne liquide dans la tige, on colore l'alcool en rouge avec de l'orseille.

Le remplissage de l'appareil s'effectue avec facilité, sans qu'il soit nécessaire d'adapter au tube une ampoule, comme on le fait dans le cas du thermomètre à mercure. Il suffit de chauffer le réservoir pendant quelques instants; une portion de l'air s'échappe, et si l'on plonge, en ce moment, l'extrémité ouverte du tube dans l'alcool, le liquide monte et s'introduit dans le réservoir. Qu'on fasse bouillir alors l'alcool qui a pénétré de manière à expulser l'air et qu'on renverse brusquement le thermomètre dans une cuvette en partie pleine du même liquide, la vapeur se condense et l'instrument se remplit complétement. S'il reste une bulle d'air, on l'expulse facilement en attachant le thermomètre à une ficelle et en le faisant tourner rapidement comme une fronde, le réservoir en dehors. La construction s'achève ensuite comme pour le thermomètre à mercure; mais on ne doit pas graduer l'instrument en prenant deux points fixes seulement. Les lois de la dilatation de l'alcool et de celle du mercure différant beaucoup l'une de l'autre, les thermomètres obtenus avec ces deux liquides ne sont pas comparables; les thermomètres à alcool ne sont même pas le plus souvent comparables entre eux; car il est bien difficile qu'ils soient tous construits avec un liquide au même degré de pureté. Il faut les graduer par comparaison avec un bon thermomètre à mercure servant d'étalon.

252. **Historique du thermomètre.** — La découverte du thermomètre date du commencement du dix-septième siècle, elle est attribuée par les uns à Drebbel, physicien et mécanicien hollandais; par les autres, à Galilée. Amontons, Réaumur, Delisle, Deluc en ont ensuite perfectionné la construction et la graduation.

253. **Variations des points fixes.** — On remarque dans les thermomètres les mieux construits un déplacement des points fixes, tantôt brusque, tantôt lent et régulier. L'écart a toujours lieu dans le même sens, il correspond à une élévation du zéro sur la tige et peut, dans certains cas, dépasser 2°; on l'explique par une diminution de capacité du réservoir. Celui-ci, après avoir été soufflé à la lampe dans la masse du tube, s'est refroidi brusquement. Les parois ont acquis par suite une sorte de trempe qui

constitue les molécules vitreuses dans une position forcée. Il en résulte, plus tard, un travail moléculaire qui ramène lentement l'enveloppe à son volume normal.

254. On fait aisément la correction voulue, lorsqu'on se sert des thermomètres destinés aux expériences de précision, qui, au lieu des degrés ordinaires, portent des divisions arbitraires d'égale capacité. Le degré centigrade se trouve alors exprimé par un nombre connu de ces divisions arbitraires. Ce nombre est déterminé par l'immersion successive du du thermomètre dans la glace fondante et l'eau bouillante; on note les numéros n et n' des divisions auxquelles le mercure affleure dans chaque cas, et le quotient $\frac{n'-n}{t}$ donne le nombre de divisions arbitraires, qui équivaut à un degré centigrade; ici t représente la température d'ébullition de l'eau au moment où l'on a opéré. Avant d'entreprendre avec ce thermomètre une série de mesures, on commence chaque fois par déterminer au juste la position du zéro, l'erreur qui tient à la variation du point fixe se trouve ainsi corrigée.

255. **Thermomètre à maxima et à minima de Bellani.** — Il est utile, dans plusieurs circonstances, de connaître la valeur du maximum et du minimum de la température, en un lieu donné et dans un intervalle de temps connu. On a recours fréquemment, dans ce but, au *thermométrographe de Bellani* qui inscrit, lui-même, les températures extrêmes. C'est un thermomètre à alcool de la forme indiquée par la figure 150. Les variations de volume de la liqueur alcoolique produisent le déplacement, dans un sens ou dans l'autre, d'une colonne de mercure II' dont les extrémités chassent devant elles deux index en émail I et I'. Ceux-ci, par l'élasticité des fils de verre K qui les terminent, s'arrêtent, dans le tube thermométrique, au point où les amène la colonne mercurielle. L'instrument ayant été gradué par comparaison avec un bon thermomètre à mercure, il suffit de faire descendre tout d'abord les deux index au contact des ménisques mercuriels, et d'abandonner ensuite l'instrument à lui-même pour que la position extrême I conservée par l'index I donne le *maximum*, et que celle de I' donne le *minimum* de la température. Le mouvement des index, que l'opérateur doit remettre en place, au début de toute observation, est facilité par la présence d'un petit cylindre de fer doux enveloppé dans le tube en émail de l'index; un aimant qu'on fait glisser le long du tube entraîne, sans secousses, le petit cylindre mobile.



Fig. 150.

256. **Thermomètre à maxima de M. Walferdin.** — Par sa construc-

tion même, le thermométrographe ne peut être employé lorsque, dans la détermination du maximum et du minimum, l'appareil est sujet à recevoir des secousses ; la mobilité des index rendrait les résultats très-incertains. On se sert alors du thermomètre à déversement de M. Walferdin, que nous décrirons succinctement. Celui qui est destiné à la mesure du maximum est un thermomètre ordinaire (*fig.* 151), portant dans le haut un bec effilé *a* en communication avec une ampoule de verre *m*. Après avoir chauffé le réservoir *r*, de manière à remplir complétement la tige de mercure jusqu'à l'extrémité de la pointe *a*, on renverse l'instrument pour mettre le mercure de l'ampoule en contact avec le bec effilé et on laisse le réservoir se refroidir à une température inférieure à celle du maximum, qu'on veut évaluer ; le mercure de l'ampoule rentre dans le tube en aussi grande quantité qu'on désire. On replace alors le thermomètre dans sa position normale et on le fait descendre dans l'enceinte, dont on veut évaluer la température, au fond d'un puits artésien, par exemple. A mesure que l'instrument descend et que la température des couches traversées s'élève, le mercure se déverse de plus en plus dans l'ampoule. On le laisse au fond du puits, pendant quelques heures ; et, avant de le remonter, on donne une petite secousse pour détacher la dernière gouttelette qui sort par la pointe *a*. Revenu à la surface du sol, le thermomètre est plongé dans un bain, dont on élève progressivement la température, jusqu'au moment où la tige se remplit de nouveau complétement de mercure, comme elle l'était au fond du puits. La température du bain, indiquée par un thermomètre ordinaire qui s'y trouve plongé, est égale à la température cherchée.



Fig. 151. Fig. 152.

257. Thermomètre à minima de Walferdin. — Dans le thermomètre à *minima*, le bec est placé à la jonction de la tige et du réservoir inférieur (*fig.* 152). La substance qui se dilate est l'alcool ; mais un long index de mercure peut être introduit dans la tige à la volonté de l'opérateur, et c'est cet index qui permet l'estimation du *minimum*.

Voici comment on procède : on connaît toujours, à quelques degrés près, la température qu'on va mesurer ; est-elle, par exemple, d'environ 12° ? On introduit dans la tige, en renversant le thermomètre et en élevant sa température, un index de mercure de longueur telle que l'instrument, replacé dans sa position primitive et ramené à la température de l'air ambiant, 15°, ait son index qui affleure, par la partie inférieure, à l'extrémité de la pointe. On descend le thermomètre dans

l'enceinte voulue ; si la température est inférieure à 15°, il tombe du mercure de la tige dans le réservoir r, et au moment de l'équilibre, l'index affleure encore en a. On ramène l'instrument à la surface du sol et, comme pour le thermomètre à *maxima*, par l'emploi d'un bain qu'on refroidit progressivement, on ramène l'index à occuper la même position. La température du bain est dès lors la même que celle de l'enceinte.

258. **Thermomètre différentiel de Leslie.** — Il est une autre sorte de thermomètre fréquemment employé par Leslie dans ses études sur la chaleur rayonnante et qui porte le nom de *thermomètre différentiel*. Il est destiné à donner la différence des températures de deux enceintes voisines. Deux boules de verre de capacités égales A et B sont réunies l'une à l'autre par l'intermédiaire d'un tube de diamètre étroit deux fois recourbé à angle droit (*fig.* 153). Les boules sont pleines d'air ; les deux branches du tube contiennent de l'acide sulfurique coloré qui est introduit par l'appendice m fermé ensuite à la lampe. En échauffant convenablement l'une ou l'autre des deux boules, on arrive, par tâtonnement, à distribuer également entre elles la masse totale d'air ; ce partage est obtenu, lorsque, les deux sphères étant portées à la même température, les niveaux de liquide se placent sur le même plan horizontal ; on marque zéro au niveau de l'acide dans chaque branche. Les deux boules sont ensuite placées dans des bains séparés dont les températures diffèrent de 5°, par exemple ; le liquide descend alors du côté de la boule la plus chaude et monte de l'autre ; aux niveaux qu'il atteint on marque 5, et on divise l'intervalle en cinq parties égales, en prolongeant les divisions au-dessus et au-dessous du zéro. Ainsi gradué, l'instrument fournira, par ces indications, l'excès de la température de la boule la plus chaude sur celle de la boule la plus froide. D'ailleurs le calcul établit que la différence des hauteurs du liquide dans les deux branches est proportionnelle à la différence de leurs températures, et que par suite la première peut servir de mesure à la seconde. Nous démontrerons, au chapitre des *Applications des dilatations*, que cette proportionnalité doit être admise.

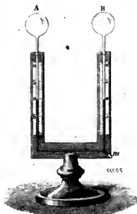


Fig. 153.

259. **Pyromètre de Wedgwood.** — Le thermomètre à mercure ne peut fournir de bonnes indications que jusqu'à 300° environ ; pourtant, on a souvent besoin, dans l'industrie, d'évaluer des températures beaucoup plus élevées. C'est alors qu'on se sert de pyromètres pourvus d'une gra-

duation empirique et qui permettent, non pas d'estimer en degrés du thermomètre à mercure ou du thermomètre à air les températures demandées, mais bien de reconnaître si une enceinte est suffisamment échauffée pour amener telle ou telle fusion, pour produire telle ou telle réaction chimique. Le pyromètre dû à l'anglais Wedgwood est fondé sur la contraction que l'argile éprouve quand on la chauffe, contraction qui a pour cause un changement dans la nature chimique des composés qui la constituent. On découpe avec un même moule de petits cylindres formés de parties égales d'argile et d'alumine calcinées; on les sèche à la chaleur du rouge naissant et on les fait pénétrer jusqu'au trait *o* entre deux règles métalliques R et R' qui comprennent entre elles un angle très-petit (*fig.* 154). Portés dans le four dont on veut estimer la température, ils éprouvent un retrait d'autant plus grand que cette température est plus haute. En les engageant de nouveau dans la même rainure, après leur refroidissement, ils pénètrent plus avant que tout à l'heure. Le point où ils s'arrêtent, sur la graduation arbitraire des règles, permet de reconnaître si la température voulue est atteinte.



Fig. 154.

260. **Pyromètre de Brongniart.** — Le pyromètre de Brongniart est fondé sur la dilatation d'une règle métallique d'argent A (*fig.* 155), qu'on place dans une rainure creusée dans un bloc de porcelaine M, substance très-peu dilatable, si on la compare à l'argent. La règle, qui s'allonge quand on la chauffe, agit par l'intermédiaire d'une baguette de porcelaine B sur le petit bras C d'un levier qui est mobile autour d'un axe O et dont le long bras sert d'aiguille indicatrice, sur un cadran gradué. La masse de porcelaine et la règle d'argent sont placées dans le four, dont la température doit être estimée approximativement. La baguette qui transmet l'allongement du métal aboutit en dehors de l'enceinte échauffée et met en mouvement le levier CO. La position finale de l'aiguille sur le cadran renseignera donc l'opérateur sur la température du four, à la condition qu'on aura fait à l'avance une graduation empirique de l'instrument.



Fig. 155.

Les pyromètres employés dans les expériences de physique sont fondés sur la dilatation des gaz ou des vapeurs. (V. le ch. de la *Dilatation des gaz.*)

CHAPITRE II

DILATATION DES CORPS

261. **Notions préliminaires.** — Tous les corps augmentent de volume quand on les chauffe, et se contractent si on les refroidit. C'est là une loi générale de la nature, que nous avons vérifiée, dans quelques cas particuliers, à l'aide des expériences décrites plus haut (237), expériences qui nous ont servi de point de départ pour la construction des thermomètres. Mais les diverses substances prises sous le même volume initial se dilatent de quantités bien différentes, lorsqu'on fait varier leur température d'un même nombre de degrés. Une barre de fer de 10 mètres de longueur que l'on retire de la glace fondante pour la porter dans l'eau bouillante, s'allonge de $12^{mm},2$; tandis que, placée dans les mêmes conditions, une barre de cuivre de 10 mètres s'allonge de $17^{mm},2$, une barre de plomb de même longueur s'accroit de $28^{mm},5$, etc. Chaque corps possède donc, au point de vue de sa dilatation par la chaleur, une propriété spécifique qui peut servir à le caractériser. D'autre part, si pour la plupart des substances solides, on mesure les accroissements successifs de volume pris par l'une d'elles, lorsque, dans des limites assez étendues, on fait croître sa température de quantités égales, on trouve que les accroissements sont aussi égaux entre eux. De 0° à 50°, l'allongement de la barre de plomb de 10 mètres est à peu près égal à $14^{mm},25$, moitié de l'allongement qu'elle subit, en passant de 0 à 100°.

262. **Coefficient de dilatation.** — Ainsi, d'un côté, pour un même corps, l'accroissement de volume est, dans certaines limites, proportionnel à l'accroissement de température, de l'autre, il est évidemment proportionnel à la longueur primitive ; donc, si l'on connaissait le nombre qui exprime *l'augmentation de l'unité de volume d'une substance prise à 0° quand sa température s'élève de 1 degré* (nombre qu'on appelle *coefficient de dilatation* de cette substance), on aurait immédiatement le moyen de déterminer, *à priori*, l'accroissement total de volume que prendra le volume V_0 pris à 0°, quand la température augmentera d'un nombre quelconque T de degrés. En appelant K le coefficient de dilatation de ce corps, on aura, d'après la définition précédente, pour l'accroissement total x de volume :

$$x = V_0 K T$$

On tire de cette égalité $K = \frac{x}{V_0 T}$. Ceci nous montre qu'on obtiendra le coefficient de dilatation d'une substance, en divisant l'accroissement total de volume, qu'elle acquiert, et par son volume primitif et par l'augmentation de température qu'elle a subie.

Avant de déterminer, par l'expérience, la valeur des coefficients de dilatation des différents corps, nous allons nous occuper, tout d'abord, de traiter quelques questions fondamentales, que nous sommes dès à présent en mesure de résoudre en utilisant les notions précédentes. Les formules que nous obtiendrons sont d'un usage très-fréquent, dans toutes les recherches physiques qui se rapportent aux changements de volume des corps, sous l'influence de la chaleur.

PROBLÈMES GÉNÉRAUX DES DILATATIONS

263. PROBLÈME I. — *Connaissant le volume V_0 à 0° d'un corps quelconque, trouver quel sera son volume total V_t à t°, le coefficient de dilatation* K *du corps étant donné.*

Le volume 1 à 0° devient $(1 + Kt)$ en passant à t°. Cela résulte de la définition même du coefficient de dilatation ; donc le volume V_0 à 0° devient $V_0 (1 + Kt)$ en passant à t°, et l'on a par suite :

$$V_t = V_0 (1 + Kt) \qquad (1).$$

Ce facteur $(1 + Kt)$ se nomme le binôme de dilatation. On tire de l'égalité précédente cette règle générale : *Pour passer du volume à 0° au volume à t°, multipliez le volume à 0° par le binôme de dilatation.*

PROBLÈME II. — Réciproquement, *pour passer du volume à t° au volume à 0°, divisez le volume à t° par le binôme de dilatation.* On tire en effet de (1):

$$V_0 = \frac{V_t}{1 + Kt}.$$

PROBLÈME III. — *Connaissant le volume V_t à t°, trouver le volume $V_{t'}$ à t'°.*

Puisque le volume à 0° se déduit du volume à t° en effectuant la division de V_t par $(1 + Kt)$, il suffira de multiplier ce quotient $\left(\frac{V_t}{1 + Kt}\right)$ par le binôme de dilatation $(1 + Kt')$ pour avoir le volume cherché. On aura donc :

$$V_{t'} = V_t \frac{1 + Kt'}{1 + Kt}. \qquad (a)$$

D'où se déduit la solution du troisième problème. *Pour passer du volume*

à t^o au volume à t'^o, multipliez le volume à t^o par le rapport direct des binômes de dilatation.

264. En effectuant la division de $(1 + Kt')$ par $(1 + Kt)$ et en négligeant les termes qui contiennent les puissances de K supérieures à la première, on présente quelquefois la valeur de $V_{t'}$ sous la forme plus simple :

$$V_{t'} = V_t [1 + K(t' - t)]; \qquad (b)$$

Mais on n'est en droit de négliger les termes en K^2, K^3, etc., qu'autant que K est très-petit, quand il s'agit des solides par exemple. K est égal pour le fer à $\frac{1}{28200}$, pour le cuivre à $\frac{1}{19400}$, etc.; alors K^2 est une fraction de l'ordre des cent-millionièmes, et la formule (*b*) peut être employée sans inconvénient. Quand il s'agit des gaz, pour lesquels la valeur de K est en moyenne $\frac{1}{273}$, la formule (*a*) sera préférable.

Les formules précédentes s'appliquent tout aussi bien, et le raisonnement pour les établir est le même, dans le cas où l'on veut calculer les variations de longueur d'un solide qu'on réchauffe ou qu'on refroidit; il suffit de prendre alors pour valeur de K *l'allongement de l'unité de longueur de la substance à partir de 0° pour l'accroissement d'un degré dans la température.* K exprime cette fois le coefficient de *dilatation linéaire.*

265. Problème IV. — *Connaissant le poids spécifique D_t d'un corps solide ou liquide à t^o, trouver son poids spécifique à t'^o.*

La formule $P = VD$ établie (113) montre que, si le volume d'un corps change tandis que son poids reste constant, le poids spécifique varie en raison inverse du volume. Car, si pour un premier état de la substance, on a $P = VD$, pour le second on aura $P = V'D'$, d'où

$$VD = V'D' \quad \text{ou} \quad \frac{V}{V'} = \frac{D'}{D}.$$

Dans la question actuelle, on aura donc :

$$\frac{D_{t'}}{D_t} = \frac{V_t}{V_{t'}} = \frac{1 + Kt}{1 + Kt'},$$

d'où

$$D_{t'} = D_t \left(\frac{1 + Kt}{1 + Kt'} \right). \qquad (c)$$

Donc, pour passer du poids spécifique à t^o au poids spécifique d'un même corps à t'^o, multipliez le premier par le rapport inverse des binômes de dilatation.

266. Problème V. — Le volume des corps gazeux ne dépend pas seulement de leur température, mais encore de la pression qu'ils supportent, le problème qui les concerne doit être énoncé ainsi :

Connaissant le volume V_t d'un gaz à la température de t^o et sous la pression H, *trouver le volume qu'occupera la même masse gazeuse à t'^o et sous la pression* H' ; *le coefficient de dilatation du gaz étant* α.

Le volume modifié par la seule influence de la température serait d'après (*a*) $V_t\left(\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}\right)$; mais si la pression, de H qu'elle était, devient H', la masse gazeuse demeurant constante, la loi de Mariotte est applicable, et l'on a :

$$\frac{V_{t'}}{V_t\left(\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}\right)}=\frac{H}{H'},\quad \text{d'où}\quad V_{t'}=V_t\frac{H}{H'}\times\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}. \qquad (d)$$

Donc, *dans le cas d'un gaz, pour passer du volume à t^o au volume à t'^o quand la pression varie de* H *à* H', *multipliez le premier par le rapport inverse des pressions et par le rapport direct des binômes de dilatation.*

267. Problème VI. — *Connaissant le poids spécifique* D_t *d'un gaz à la température t et sous la pression* H, *trouver son poids spécifique* D_t' *à la température t' et sous la pression* H.

Appliquant ici le raisonnement déjà fait pour résoudre le problème IV (265), on a de suite :

$$D_{t'}=D_t\frac{H'}{H}\times\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}.$$

Or, le rapport des poids spécifiques d'un corps est égal au rapport des poids de volumes égaux de ce corps, dans les deux circonstances où on le place (113). Désignant par P_t et $P_{t'}$ les poids d'un même volume de la substance gazeuse aux températures t et t' sous les pressions H et H', on aura :

$$P_{t'}=P_t\frac{H'}{H}\times\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}. \qquad (e)$$

Donc, quand on connait le poids d'un certain volume de gaz à une température et à une pression données, pour obtenir le poids d'un volume égal du même gaz à une autre température et à une autre pression, *il faut multiplier le premier poids par le rapport direct des pressions et par le rapport inverse des binômes de dilatation.*

On trouvera, dans le recueil de problèmes placé à la fin du cours, de nombreuses applications numériques se rapportant aux formules que nous venons d'obtenir.

SECTION I

Dilatation des solides.

268. Un solide dont on élève la température se dilate dans tous les sens à la fois ; et, s'il est homogène, il conserve, après son échauffement, une forme semblable à celle qu'il possédait au début.

Cependant, on peut avoir besoin de connaître la dilatation du corps, tantôt dans un sens seulement, c'est-à-dire sa variation de longueur ou sa *dilatation linéaire;* tantôt la variation de sa surface ou sa *dilatation superficielle;* tantôt la variation totale du volume ou sa *dilatation cubique*.

269. **Relation entre la dilatation cubique et la dilatation linéaire d'un même corps.** — Supposons que le corps satisfasse à la condition d'homogénéité indiquée plus haut ; il est facile de voir qu'il suffit de déterminer expérimentalement son coefficient de dilatation linéaire pour en déduire les deux autres.

Le corps à 1° et le corps à 0° sont, avons-nous dit (268), deux solides semblables ; leurs volumes V_1 et V_0 sont donc entre eux comme les cubes des côtés homologues. l_0 et l_1 étant les longueurs d'une même arête aux deux températures considérées et λ le coefficient de dilatation linéaire, on aura d'après le problème I (263) :

$$\frac{V_1}{V_0} = 1 + K \qquad \frac{l_1}{l_0} = 1 + \lambda.$$

Or

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{l_1^3}{l_0^3},$$

donc :

$$1 + K = (1 + \lambda)^3 = 1 + 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3,$$

ou bien :

$$K = 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3.$$

Or λ étant très-petit (le platine a pour coefficient de dilatation linéaire 0,0000086), les termes qui contiennent λ^2 et λ^3 sont négligeables, car ils sont d'un ordre de grandeur bien moindre que les erreurs possibles de l'expérience qui donne λ. Dans le cas du platine, par exemple, on a :

$$\begin{aligned} 3\lambda &= 0,0000258 \\ 3\lambda^2 &= 0,000000000222 \\ \lambda^3 &= 0,0000000000000006 \\ \hline \end{aligned}$$

donc :

$$K = 0,0000258002220006$$

Ainsi, en prenant $K = 3\lambda$, on a une expression qui diffère extrêmement peu

de la vraie valeur de K. *Le coefficient de dilatation cubique est donc le triple du coefficient de dilatation linéaire.* On démontrerait de même que le coefficient de dilatation superficielle est le double du coefficient de dilatation linéaire.

270. **Détermination des coefficients de dilatation linéaire.** — Comme la dilatation des corps solides est en général très-faible, l'expérience propre à donner, avec précision, la mesure de leur coefficient de dilatation linéaire est très-délicate. Il faut opérer, en premier lieu, sur des barres d'une assez grande longueur, afin que l'allongement à évaluer acquière une valeur notable. Il faut, en second lieu, que l'appareil de mesure offre une grande stabilité et une grande sensibilité; il faut enfin, et ce résultat est assez difficile à obtenir, pouvoir, à des degrés d'échauffement très-divers, maintenir la longue barre, sur laquelle on opère, à une température bien égale dans ses différentes parties.

Lavoisier et Laplace en 1782, Ramsden en 1785 ont imaginé des appareils très-ingénieux pour effectuer la mesure qui nous occupe. Les résultats obtenus par les physiciens français méritent surtout une grande confiance.

271. **Méthode de Lavoisier et Laplace. Principe théorique.** — Un petit instrument employé fréquemment dans les cours de physique pour montrer le phénomène de la dilatation des corps solides, sous l'action de la chaleur, donne le principe théorique de la méthode expérimentale suivie par Lavoisier et Laplace. Cette sorte de pyromètre consiste en une tige métallique T (*fig.* 156), qui est rendue fixe à l'une de ses extrémités par la vis de pression V et dont l'extrémité libre *b* vient appuyer contre le petit bras O*b* d'un levier coudé mobile autour d'un axe O. Le grand bras de ce levier est représenté par l'aiguille A qui se meut sur un cadran gradué. Si, en enflammant l'alcool dans le réservoir demi-cylindrique G, on chauffe la tige métallique, l'allongement en est rendu sensible et amplifié par le mouvement de l'extrémité de l'aiguille. Il suffira que celle-ci ait une longueur 100 fois plus grande que O*b*, pour que le déplacement de l'extrémité A soit centuple de l'allongement de la tige T; toutefois, pour que ceci soit rigoureusement exact, il faut estimer le déplacement de A, non sur l'arc décrit, mais sur la tangente menée à cet arc au point où

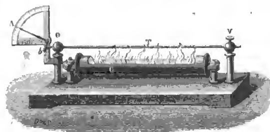


Fig. 156.

l'extrémité de l'aiguille (à ce moment, horizontale) se trouvait au début de l'expérience. Il est donc possible d'augmenter, autant qu'on le voudra, la sensibilité de l'appareil qui permet de mesurer la très-faible dilatation des barres métalliques.

272. **Description de l'appareil.** — Dans l'appareil de Lavoisier et Laplace, le petit bras du levier coudé est représenté par une tige de

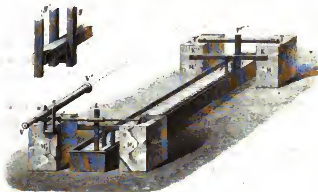


Fig. 157.

verre LL' (*fig.* 157), qui est mobile autour de l'axe fixe OO' et contre laquelle vient s'appliquer l'extrémité libre de la barre métallique, dont on veut mesurer la dilatation linéaire. L'aiguille destinée à amplifier l'allongement de la barre par le mouvement de son extrémité est constituée ici par l'axe optique de la lunette VV' tournant autour de la ligne *aa'* parallèle à OO'. Cet axe optique prolongé parcourt pendant la rotation de la lunette une règle verticale graduée en pouces et en lignes, placée en X, à une distance de 100 toises.

Le rapport de longueur des deux bras LL' et *a*X du levier coudé étant $\frac{1}{744}$, il en résultait que pour une ligne d'augmentation dans la longueur de la barre, l'axe optique parcourait 62 pouces ou 744 lignes sur la mire graduée, et l'on pouvait alors estimer la dilatation linéaire du métal à $\frac{1}{744}$ de ligne près. Mais cette grande sensibilité eût été tout à fait illusoire, si la barre n'avait point eu son extrémité postérieure absolument fixe, et si l'axe de rotation du levier coudé avait pu subir le moindre dérangement.

273. Pour obtenir la stabilité parfaite de l'appareil, si nécessaire dans ce genre de mesures, Lavoisier et Laplace firent solidement installer, aux quatre sommets d'un rectangle, quatre gros dés en pierre de taille M, M', M_1, M'_1. Les fondations en maçonnerie qui les supportaient descendaient à 6 pieds de profondeur. Chacun des piliers avait 2 pieds de lon-

gueur et 1 pied de largeur, et les distances de M à M′ et de M_1 à M'_1, étaient de 3 pieds.

L'extrémité postérieure de la barre venait buter contre la lame de glace FF′, placée de champ, qui était rendue absolument fixe par les traverses de fer telles que TT′, scellées dans les piliers ; des lames verticales de verres g, g' soutenaient, à l'aide de rouleaux r, la barre métallique, en lui laissant toute facilité pour se dilater. La barre métallique dont la longueur L (6 pieds) à 0° avait été estimée à l'avance, plongeait, ainsi soutenue, dans une caisse métallique C où on l'entourait successivement de glace fondante et d'eau bouillante. Enfin, on cherchait à réaliser le mieux possible, par l'agitation des couches liquides formant le bain, cette condition : que, dans toute sa longueur, la barre possédât la même température, au moment où l'on mesurait son allongement.

274. Ces détails bien compris, on devine la marche des expériences : il fallait noter, chaque fois, quelle était la division de la mire qui coïncidait avec le fil horizontal de la lunette, soit quand la barre possédait la température de 0°, soit quand elle était portée à $t°$. Si l'axe optique parcourait ainsi une distance de n lignes sur la mire verticale, $\frac{n}{744}$ était l'allongement total de la barre exprimé en lignes ; $\frac{n}{744 . t}$, l'allongement total pour 1° ; et finalement $\frac{n}{744 . t . L}$ était l'allongement de l'unité de longueur pour 1° ou le coefficient de dilatation linéaire du métal qui formait la barre. Les expériences de Lavoisier et Laplace mirent hors de doute les résultats que nous annoncions au commencement de ce chapitre (261), à savoir : qu'entre 0° et 100° l'accroissement de longueur des barres métalliques est proportionnel à l'accroissement de leur température. En outre, les différents corps solides reprenaient sensiblement leur longueur lorsque, après les avoir chauffés, on les laissait revenir lentement à leur état calorifique primitif.

275. La méthode que nous venons d'exposer ne permettait pas d'obtenir les dilatations linéaires à des températures élevées : on fut même obligé de renoncer à l'emploi d'un fourneau en maçonnerie placé entre les piliers et qui était primitivement destiné à chauffer de l'huile dans la caisse C. Le rayonnement direct du foyer, en échauffant des points assez éloignés, ôtait à la lame FF′ cette fixité qu'il est indispensable de réaliser.

M. Pouillet, en se servant d'un appareil de mesure entièrement distinct du vase où la dilatation s'opérait, est parvenu à effectuer quelques déterminations importantes, à de très-hautes températures. La barre était placée dans un fourneau spécial où circulait de l'air fortement échauffé. Des écrans bien disposés empêchaient, d'ailleurs, la chaleur rayonnante du foyer de produire des perturbations dans l'appareil de mesure.

276. Détermination directe du coefficient de dilatation cubique des solides. — L'état moléculaire des métaux dépend de la manière dont ils ont été obtenus, de la trempe qu'ils ont subie, des actions mécaniques mises en jeu pour produire leur forme actuelle ; aussi est-il bien difficile que l'homogénéité de constitution, dont nous avons déjà parlé, se trouve assez complétement réalisée pour que le coefficient de dilatation cubique se calcule avec rigueur, en triplant le coefficient de dilatation linéaire. Il était donc indispensable de l'évaluer directement.

Méthode de Dulong et Petit. — Dulong et Petit ont employé, à cet effet, la méthode suivante fondée sur la connaissance du coefficient de dilatation absolue du mercure, que nous déterminerons plus loin (284). Dans un tube de verre qui était fermé à l'une de ses extrémités et dont le diamètre avait 18 millimètres et la longueur 6 décimètres, ils introduisaient une règle cylindrique antérieurement pesée, faite avec un métal non attaquable par le mercure. Soit P' son poids. Puis, le tube de verre étant effilé à la lampe et recourbé (*fig.* 158), on le remplissait de mercure pur, qu'on faisait bouillir pour chasser l'air, comme s'il s'était agi de la construction d'un véritable thermomètre.



Fig. 158.

Dans ces conditions, on plaçait horizontalement l'appareil dans la glace fondante, et on faisait plonger la pointe recourbée dans le mercure d'une capsule C. Pendant son refroidissement, le tube se remplissait de mercure à 0°. On retirait la capsule, on vidait l'excédant de mercure qui s'y trouvait, et on la replaçait sous la pointe. Ces précautions prises, il n'y avait plus qu'à peser à la fois le tube et la capsule ; puis à retrancher, de leur poids actuel, leur poids primitif avant l'introduction du mercure, pour avoir exactement le poids P du mercure qui remplissait à 0°, dans le tube de verre, la capacité non occupée par la tige métallique. L'appareil était alors porté dans un bain d'huile de température T, et on pesait le mercure qui s'échappait par la pointe. L'expérience était complète ; toutes les données nécessaires à la mesure du coefficient de dilatation cubique du métal avaient été obtenues.

Soient D_0 et D'_0, la densité à 0° du mercure et du métal ; Δ, x et K les coefficients de dilatation cubique du mercure, du métal et du verre formant le tube : les volumes à 0° de ces trois substances seront :

$$\frac{P}{D_0}, \quad \frac{P'}{D'_0}, \quad \left(\frac{P}{D_0} + \frac{P'}{D'_0}\right).$$

Puisqu'il s'est échappé par la pointe un poids p de mercure, il n'en reste dans le tube, au moment où la température est T, qu'un poids $P - p$.

Écrivons qu'à T° la somme des volumes du mercure et du métal est égale au volume du vase qui les contient.

$$\left(\frac{P-p}{D_0}\right)(1+\Delta T)+\frac{P'}{D_0'}(1+xT)=\left(\frac{P}{D_0}+\frac{P'}{D_0'}\right)(1+KT).$$

De là, on tire

$$x=\frac{pD_0'}{P'D_0T}+\frac{D_0'}{P'}\left\{\left(\frac{P}{D_0}+\frac{P'}{D_0'}\right)K-\left(\frac{P-p}{D_0}\right)\Delta\right\}.$$

277. Qu'on place dans le même réservoir, au lieu d'une règle métallique, une baguette d'un verre de même nature que celui qui constitue l'enveloppe vitreuse, qu'on répète la même expérience, et qu'on remplace dans la formule K par x, la nouvelle valeur de x ainsi obtenue donnera le coefficient de dilatation cubique du verre, qu'il est indispensable de connaître d'avance, pour appliquer aux autres corps solides la méthode de Dulong et Petit. Seulement, cette fois, on n'aura pas besoin de peser la baguette et de connaître les densités du verre et du mercure, car la valeur de x qui convient à ce cas particulier :

$$x=\frac{(P-p)\Delta T-p}{PT}$$

ne contient plus P', D_0', D_0. Cela revient à dire qu'on peut faire cet essai préalable pour fixer le coefficient de dilatation cubique du verre, sans introduire aucune règle de verre dans l'intérieur du tube, et se contenter de déterminer, 1° le poids P du mercure qui remplit la capacité totale du tube à 0° ; 2° le poids p du mercure déversé dans la capsule ; 3° la température T du bain d'huile ; car la valeur de x dans l'équation précédente ne dépend plus que de ces trois quantités et du coefficient de dilatation absolue du mercure Δ supposé connu. Cela revient, en définitive, comme nous le verrons bientôt, à faire l'expérience du *thermomètre à poids*, en prenant pour inconnue, non pas la température, mais bien le coefficient de dilatation du verre.

278. **Résultats numériques. Valeurs des coefficients de dilatation linéaire et de dilatation cubique.** — Les coefficients de dilatation linéaire et les coefficients de dilatation cubique des corps solides ont été déterminés par un grand nombre de physiciens. Parmi les résultats obtenus, nous avons réuni, en un tableau, ceux qui se rapportent aux substances le plus fréquemment employées, soit dans l'industrie, soit dans les expériences de physique.

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE.

Verre en tube	$\frac{1}{128000}$	$= 0{,}00000781$
Flint-glass anglais	$\frac{1}{124800}$	$= 0{,}00000801$
Verre en verge	$\frac{1}{123700}$	$= 0{,}00000808$
Platine	$\frac{1}{116700}$	$= 0{,}0000086$
Fer doux forgé	$\frac{1}{81900}$	$= 0{,}0000122$
Acier trempé	$\frac{1}{80700}$	$= 0{,}0000124$
Or	$\frac{1}{68200}$	$= 0{,}0000147$
Cuivre rouge	$\frac{1}{58300}$	$= 0{,}0000172$
Laiton	$\frac{1}{53200}$	$= 0{,}0000188$
Argent	$\frac{1}{52400}$	$= 0{,}0000191$
Étain	$\frac{1}{46200}$	$= 0{,}0000216$
Plomb	$\frac{1}{35100}$	$= 0{,}0000285$
Zinc	$\frac{1}{34000}$	$= 0{,}0000294$
Glace	$\frac{1}{20000}$	$= 0{,}0000500$

COEFFICIENTS DE DILATATION CUBIQUE

(D'après Dulong.)

Verre à	100° du thermomètre à air.	$\frac{1}{38700}$	$= 0{,}0000258$
	200° id.	$\frac{1}{36300}$	$= 0{,}0000275$
	300° id.	$\frac{1}{32900}$	$= 0{,}0000304$
Fer à	100° id.	$\frac{1}{28200}$	$= 0{,}0000355$
	300° id.	$\frac{1}{22700}$	$= 0{,}0000441$
Cuivre à	100° id.	$\frac{1}{19400}$	$= 0{,}0000515$
	300° id.	$\frac{1}{17700}$	$= 0{,}0000565$

Platine à...........	100° du thermomètre à air.	$\frac{1}{37700}$	= 0,0000265
	300° id...............	$\frac{1}{36300}$	= 0,0000275
	(D'après M. Regnault.)		
Verre ordinaire à.....	100° du thermomètre à air.	$\frac{1}{36220}$	= 0,0000276
	300° id...............	$\frac{1}{32720}$	= 0,0000305
Cristal de Choisy-le-Roi à	100° id.....	$\frac{1}{43866}$	= 0,0000228
	300° id...............	$\frac{1}{42918}$	= 0,0000233

279. **Conséquences générales à déduire des nombres précédents.** — Un fait général ressort de la comparaison de ces nombres : c'est que, si l'on compte les températures sur le thermomètre à air, les coefficients de dilatation des corps solides vont en croissant avec la température ; de telle sorte que des thermomètres construits avec les corps solides ne s'accorderaient avec le thermomètre à air qu'aux points fixes servant à la graduation. Au delà de 100°, les thermomètres métalliques seraient en avance sur le thermomètre à air. Il n'est donc pas tout à fait exact de dire que le volume d'un corps augmente d'une quantité constante, pour chaque degré d'élévation dans la température ; mais, dans le cas des corps solides, la différence est si faible, qu'il n'y a presque jamais lieu d'en tenir compte. Il était bon pourtant de la signaler.

On remarquera aussi que, pour les verres, le coefficient de dilatation est notablement différent d'une espèce à l'autre ; cela tient à la différence de leur composition chimique. Des expériences très-délicates de M. Regnault ont montré, en outre, que le coefficient change notablement suivant la manière dont le même verre a été travaillé ; si bien qu'il devient nécessaire, dans les expériences de précision, de faire une évaluation directe de la dilatation sur le vase de verre qui est employé. Nous avons vu (277) comment on y arrive. Au reste, cette influence exercée sur la valeur des coefficients de dilatation d'une substance par le genre de travail auquel elle a été soumise, ne concerne pas seulement les substances vitreuses. La structure des corps métalliques, quand elle est modifiée par des actions mécaniques, amène toujours un changement appréciable dans leur dilatabilité : ainsi le fer fondu, le fer forgé, le fer écroui, n'ont pas le même coefficient de dilatation.

280. **Dilatation des cristaux.** — Enfin, des déterminations de coefficient de dilatation ont été aussi tentées sur les substances cristallines, appartenant aux groupes dont l'élasticité est variable dans diverses directions, sur le spath d'Islande, par exemple, qui cristallise dans le sys-

tème rhomboédrique. Nous n'en dirons qu'un mot : la mesure des angles dièdres du cristal que l'on porte à diverses températures, a indiqué des variations angulaires, qui sont la preuve évidente d'une dilatation inégale dans le sens de l'axe cristallographique et dans un plan perpendiculaire à ce dernier.

SECTION II

Dilatation des liquides.

Les liquides étant toujours contenus dans des vases, on ne peut élever leur température sans que le vase se dilate lui-même en même temps, et masque, par suite, au moins en partie, la dilatation du liquide. De là résulte la nécessité d'étudier séparément : 1° la dilatation apparente des liquides dans les vases qui les renferment; 2° leur dilatation vraie ou absolue considérée indépendamment de celle du vase.

281. **Influence exercée par la dilatation du vase.** — L'expérience que nous avons décrite (237) est très-propre à mettre en évidence l'influence des parois solides sur la dilatation apparente d'un liquide. Nous avons constaté que, dès les premiers instants de l'immersion dans l'eau bouillante d'un ballon de verre rempli d'un liquide coloré (*fig.* 159); alors que la chaleur n'a atteint que les parois et n'a pas pénétré jusqu'au liquide, le niveau descend brusquement, du point m où il se trouvait d'abord, en m'. C'est le vase qui s'est dilaté le premier, et, comme sa capacité augmente, le liquide semble se contracter; mais bientôt la chaleur passe de la paroi solide au liquide intérieur en contact, et, comme ce dernier a un coefficient de dilatation plus grand que celui du verre, le niveau remonte rapidement dans le tube et dépasse bientôt le point m.

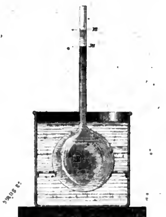


Fig. 159.

Il est important de remarquer, à ce propos, que, lorsqu'on chauffe un vase, l'accroissement de son volume intérieur est égal à celui que prendrait un noyau solide de la même substance remplissant exactement la capacité du vase. Ce résultat est mis en évidence par une expérience très-simple de S'Gravesande. Une sphère de laiton peut passer à frottement doux dans un anneau du même métal; qu'on porte ces deux corps, boule

et anneau, à une même température, quelle qu'elle soit d'ailleurs, on reconnaît qu'ils se juxtaposent comme précédemment, quoique le volume de l'un et de l'autre ait changé. L'anneau s'est donc dilaté comme l'eût fait un disque de laiton plein placé dans des conditions identiques.

282. **Relation entre les coefficients de dilatation apparente et de dilatation absolue des liquides.** — Il est souvent nécessaire d'évaluer la dilatation apparente d'un liquide contenu dans un vase. Pour concevoir ce que l'on doit entendre par dilatation apparente, qu'on imagine un vase partagé en parties d'égale capacité; à 0°, un liquide occupe 64 de ces parties, si à 100° il en occupe 65; l'augmentation apparente du volume 64 a été 1, celle de l'unité de volume eût été $\frac{1}{64}$; ce nombre $\frac{1}{64}$ représente, on le voit, la dilatation du liquide, évaluée sans que l'on ait tenu compte de la dilatation du vase; et $\frac{1}{6400}$ serait le coefficient de dilatation apparente de ce liquide.

Établissons d'abord la relation qui existe entre les coefficients de dilatation absolue Δ, de dilatation apparente δ du liquide, et de dilatation cubique K du vase servant de réservoir. Soit V le volume à 0° du liquide, et par suite de la portion du réservoir que le liquide remplit; V' le volume *évalué à* 0° de la capacité de ce réservoir que le liquide dilaté remplira, quand la température aura monté de 1°. A cet instant, le volume réel du contenant sera $V'(1+K)$;... le volume réel du contenu sera $V(1+\Delta)$; on a donc :

$$V'(1+K) = V(1+\Delta),$$

d'où :

$$\frac{V'-V}{V} = \frac{\Delta - K}{1+K};$$

or $V'-V$ est l'augmentation apparente totale du volume du liquide, pour une élévation de 1° dans la température; $\frac{V'-V}{V}$ sera donc le coefficient de dilatation apparente du liquide dans le vase. On peut écrire par suite :

$$\delta = \frac{\Delta - K}{1+K}, \quad \text{d'où} \quad \Delta = \delta + K + \delta K.$$

Le produit δK de deux fractions très-petites est négligeable : ainsi, dans une expérience de Dulong et Petit, le mercure avait pour dilatation apparente dans le verre $\frac{1}{6480}$; la valeur de K se rapportant au verre employé était $\frac{1}{38700}$; le produit δK était égal à $\frac{1}{6480 \times 38700}$. On peut donc écrire $\Delta = \delta + K$, c'est-à-dire que le coefficient de dilatation absolue d'un liquide est égal à la somme des coefficients de dilatation apparente de ce liquide et de dilatation cubique du réservoir.

283. Coefficient de dilatation absolue du mercure. — Expériences de Lavoisier et Laplace. — Le mercure sert à la construction du thermomètre; il est d'un emploi très-fréquent dans les expériences de physique : n'est-il pas indispensable d'obtenir, avec exactitude, son coefficient de dilatation absolue? Cette recherche a été d'abord entreprise par Lavoisier et Laplace. Ils se servaient d'une sorte de thermomètre à mercure dont la tige était divisée en parties d'égal volume. Le réservoir et les divisions de la tige avaient été jangés à l'avance avec beaucoup de soin. L'instrument ainsi préparé, on observait le niveau atteint par le mercure quand la température était portée à 0°, $t°$, $t'°$,.... et cette observation donnait les dilatations apparentes de l'unité de volume du liquide, depuis 0° jusqu'aux divers points de l'échelle des températures. D'autre part, Lavoisier et Laplace avaient déterminé à l'avance, par leur procédé, le coefficient de dilatation linéaire d'une tige de verre de même nature que celui de leur thermomètre et le triplaient pour avoir le coefficient de dilatation cubique; car nous venons de l'établir (281) : l'augmentation de volume d'un réservoir est égale à celle qu'il subirait s'il était partie intégrante d'une masse solide et continue de la même substance. Dès lors, il suffit d'ajouter, à la dilatation apparente du mercure, précédemment observée, la dilatation cubique du verre ainsi obtenue, pour avoir la dilatation absolue du liquide. Par cette méthode, Lavoisier et Laplace ont trouvé que l'unité de volume du mercure, en passant de 0° à 100°, se dilate de $\frac{1}{55,21}$ ou que le coefficient de dilatation absolue est égal à $\frac{1}{5521}$.

283 *bis*. Mesure de la capacité d'un réservoir thermométrique et des divisions de la tige. — Il avait été nécessaire, dans l'expérience de Lavoisier et Laplace, de mesurer, à une température connue, la capacité du réservoir thermométrique et celle des divisions de la tige. C'est là une opération fréquemment exécutée en physique et sur laquelle nous devons donner, une fois pour toutes, quelques détails pratiques. Quand on veut l'exécuter, on commence par remplir, en partie, l'appareil de mercure avec les mêmes précautions que pour la construction d'un thermomètre; soit P le poids du mercure introduit. On porte l'instrument dans la glace fondante, et on constate que le mercure occupe la capacité V du réservoir, jusqu'à l'origine de la graduation, plus n divisions de la tige. A ce moment $\frac{P}{D_0}$ est le volume du mercure ; on a donc :

$$\frac{P}{D_0} = V + nv \qquad (1)$$

si l'on désigne par D_0 la densité de mercure à 0°, et par v le volume encore inconnu de chaque division. On répète la même expérience, après avoir introduit dans l'appareil un nouveau poids p de mercure ; on trouve que

le liquide ajouté occupe, à 0°, n' divisions de la tige ; et l'on a par suite $\frac{p}{D_0} = n'v$; d'où $v = \frac{p}{n'D_0}$. Substituant à la place de v sa valeur dans (1), il vient finalement :

$$V = \frac{1}{D_0}\left(P - \frac{np}{n'}\right).$$

Pour les raisons déjà indiquées (279), il n'est pas possible d'admettre que la dilatation cubique d'une tige de verre soit comparable à celle d'un réservoir travaillé à la lampe. Le nombre donné par Lavoisier et Laplace ne pouvait donc être accepté comme définitif. Des expériences nouvelles, où les causes d'erreur seraient minutieusement écartées, étaient d'autant plus nécessaires, que les coefficients admis par les expérimentateurs différaient beaucoup les uns des autres.

Dalton adoptait le nombre........	$\frac{1}{5000}$
Cavendish	$\frac{1}{5300}$
Deluc..........	$\frac{1}{5600}$
Le général Roy......................	$\frac{1}{5900}$
Schnekburgh	$\frac{1}{5400}$
Haellstroem..........	$\frac{1}{5500}$
Lalande et Delisle........	$\frac{1}{6600}$

284. Expériences de Dulong et Petit. — Principe théorique. — Dulong et Petit ont eu recours à une méthode directe, qui ne suppose nullement la connaissance de la dilatation du verre. Voici le principe théorique imaginé par Boyle, sur lequel leur procédé est fondé : si l'on introduit du mercure dans des vases de verre de large section communiquant ensemble ; si l'un des vases est maintenu invariablement à 0°, l'autre porté à une température différente connue T, et que toutes les précautions soient prises pour que les deux colonnes de température différente ne puissent pas se mélanger, il est clair que les hauteurs des deux colonnes liquides, au-dessus de leur surface commune de séparation, seront en raison inverse de leurs densités. Or, comme le rapport des densités peut s'exprimer en fonction du coefficient de dilatation (265), on voit que, de la mesure des hauteurs, il sera facile de déduire la dilatation absolue du liquide. La variation du volume des vases n'altérera, d'ailleurs, en rien le rapport des hauteurs des deux colonnes.

285. Description de l'appareil. — Cela posé, voici la description succincte de l'appareil de Dulong et Petit. Sur une table de bois mas-

sive (*fig.* 160), repose une barre de fer qui a la forme d'un T, et qui est munie de deux niveaux à bulle d'air croisés, de telle sorte qu'à l'aide de vis calantes, il soit possible de rendre horizontale la surface du T, qui

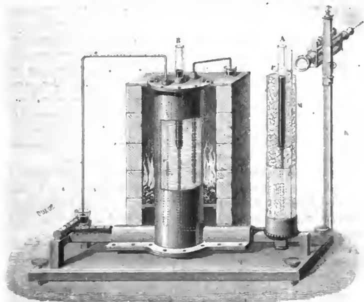


Fig. 160.

supporte le système des deux vases de verre communiquant ensemble par un tube de diamètre très-étroit. La faible section du tube de jonction est un obstacle permanent qui s'oppose au mélange, mais non à la communication des deux liquides inégalement chauds. Le vase cylindrique A demeure constamment entouré, dans toute sa longueur, de glace pilée renfermée dans un manchon de métal M ; une échancrure pratiquée à la partie supérieure du manchon permet, au moment voulu, d'écarter un peu la glace, pour rendre visible le niveau du mercure dans le vase A. Un autre manchon métallique entoure aussi le vase B ; il contient une huile fixe dont la température peut être portée à 250 et 300°. Cette huile est chauffée par un fourneau cylindrique en maçonnerie, et sa température est indiquée à la fois par un thermomètre à air et par un thermomètre à poids (289), dont les réservoirs descendent presque jusqu'au fond du manchon, se trouvent par suite en contact avec les diverses couches du bain d'huile, et dès lors indiquent, plus exactement, la température vraie du liquide. Enfin, une tige verticale en fer portant, à sa partie supérieure, un repère fixe *r* est placée dans la glace du manchon M, tout à côté du

vase A. La distance fixe du repère à l'axe du tube de jonction se mesure à l'avance avec le plus grand soin.

286. **Marche des expériences.** — L'huile du manchon M' était portée à la température voulue que l'on estimait à l'aide des deux thermomètres; on cherchait à la rendre stationnaire pendant quelques instants, et on y parvenait, en fermant les portes du fourneau, quand la température se trouvait suffisamment élevée. De cette façon, la température du bain d'huile montait encore pendant quelques instants; puis elle atteignait son maximum, où elle se maintenait pendant un temps assez notable. Alors, avec un cathétomètre et en se plaçant tout près de l'appareil, on mesurait les distances du point de repère, à chacun des niveaux de la colonne à 0° et de la colonne à T°. Pour rendre visible le niveau de cette dernière, on était obligé d'ajouter une petite quantité de mercure, afin de dépasser un peu le plan du couvercle qui fermait le manchon plein d'huile.

Si h_0 et h_T représentent les hauteurs absolues de la colonne froide et de la colonne chaude au-dessus de l'axe du tube de communication, la mesure précédente permettra d'obtenir $h_T - h_0$; h_0 se concluait d'autre part de l'estimation déjà faite de la hauteur du repère au-dessus de l'axe du tube capillaire.

En vertu du principe rappelé plus haut, on aura :

$$\frac{h_T}{h_0} = \frac{d_0}{d_T},$$

d_T et d_0, étant les densités du mercure à 0° et à T°. Mais on a aussi (265)

$$\frac{d_T}{d_0} = \frac{1}{1 + \Delta T}.$$

Δ étant le coefficient de dilatation absolue du mercure, il vient par suite :

$$\frac{h_T}{h_0} = 1 + \Delta T,$$

d'où :

$$\Delta = \frac{h_T - h_0}{h_0 T}.$$

Δ est exprimé en fonction de quantités, toutes fournies par l'expérience; on pourra donc calculer sa valeur.

287. **Résultats numériques.** — Voici les nombres obtenus par Dulong et Petit :

Température déduite de la dilatation de l'air.	Coefficient moyen de dilatation absolue du mercure.	Températures indiquées par la dilatation du mercure supposée uniforme.
0°	0	0°
100°	$\frac{1}{5550}$	100°

200°	$\frac{1}{5125}$	204,61
300°	$\frac{1}{5300}$	314,15

288. **Discussion de la méthode suivie par Dulong et Petit.** — On peut certainement adresser quelques critiques à la méthode qui vient d'être décrite. Ainsi, il est bien difficile d'admettre que la colonne d'huile qu'on ne peut pas agiter, au moment de l'observation, possède, dans toutes ses parties, la même température. La température fournie par les thermomètres était nécessairement un peu incertaine. D'un autre côté, les vases cylindriques de verre n'avaient qu'une hauteur verticale de $0^m,55$ environ, ce qui rendait la quantité $h_T - h_0$ très-petite en valeur absolue et l'erreur commise dans cette mesure devenait très-notable, par rapport à la grandeur à évaluer.

Pourtant, malgré ces causes d'inexactitude, qui ont bien leur importance, les nombres obtenus par Dulong et Petit se rapprochent beaucoup de la vérité. Des expériences sur la dilatation absolue du mercure, reprises par M. Regnault et exécutées dans de meilleures conditions, ont fourni des nombres qui s'éloignent peu de ceux que nous venons de transcrire.

289. **Thermomètre à poids.** — Le thermomètre à poids ou à déversement employé par Dulong et Petit, dans les expériences précédentes, est un instrument très-exact, pour la mesure des températures maxima, toutes les fois qu'il doit plonger dans un bain liquide d'une assez grande masse, et que la température du bain est maintenue stationnaire pendant un temps assez long ; dans d'autres conditions, c'est un appareil peu sensible et par suite peu précis. Il se compose, comme l'instrument déjà décrit (276), d'un réservoir de verre (*fig.* 161), terminé par un bec recourbé qui aboutit au-dessus d'une petite capsule. On pèse le mercure qui le remplit à 0° (soit P ce poids) ; on détermine le poids p du mercure qui se déverse dans la capsule, quand l'instrument plongé dans le bain a atteint la température stationnaire x de ce dernier.


Fig. 161.

Appelons Δ et K, les coefficients de dilatation absolue du mercure et du verre qui forme le vase ; le contenu, quand il s'est dilaté, a un volume égal à $\frac{P-p}{D_0}(1+\Delta x)$, en nommant D_0 la densité du mercure à 0°. A la même température x, la capacité du vase est devenue : $\frac{P}{D_0}(1+Kx)$. Nous aurons donc :

$$(P-p)(1+\Delta x) = P(1+Kx) \quad (1);$$

d'où on tirerait

$$K = \frac{(P-p)\Delta x - p}{Px};$$

valeur identique à celle que nous avons déjà obtenue (277). En tout cas, la valeur de x déduite de cette égalité donnera la valeur de x quand on aura à l'avance les valeurs de Δ et K. Mais nous sommes censés ne connaître encore ni Δ ni K, puisque Dulong et Petit se servaient du thermomètre à poids pour estimer la température dans l'expérience (286) où ils cherchaient à déterminer Δ. Montrons qu'il suffit, pour évaluer x, d'avoir à l'avance le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre, coefficient qui se déduit des variations apparentes de volume que subit une masse de mercure contenue dans un thermomètre, dont le réservoir et les divisions ont des capacités connues. Nous pouvons, en effet, mettre l'équation (1), sous la forme

$$\frac{P}{P-p} = \frac{1+\Delta x}{1+Kx};$$

d'où :

$$\frac{p}{(P-p)x} = \frac{\Delta - K}{1+Kx}.$$

Mais le second membre de cette égalité représente le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le vase tel que nous l'avons défini (282). Il suffit, pour le prouver, de répéter le raisonnement que nous avons déjà fait pour établir la relation qui existe entre le coefficient de dilatation absolue d'un liquide, le coefficient de dilatation apparente et celui de dilatation cubique du réservoir.

Si l'on appelle V' le volume estimé à 0° que paraît occuper le mercure à $x°$, V le volume réel de la même masse de mercure à 0° ; $V'(1+Kx)$ sera le volume véritable du vase dilaté, $V(1+\Delta x)$ sera le volume absolu du mercure contenu dans le vase, à la même température, on aura donc :

$$V'(1+Kx) = V(1+\Delta x)$$

d'où :

$$\frac{V'}{V} = \frac{1+\Delta x}{1+Kx}$$

et par suite

$$\frac{V'-V}{Vx} = \frac{\Delta - K}{1+Kx}$$

mais, $\frac{V'-V}{Vx}$, c'est, d'après notre définition (282), le coefficient de dilatation apparente du liquide dans le verre. On peut donc écrire en appelant δ ce coefficient :

$$\frac{\Delta - K}{1+Kx} = \delta$$

et substituant :

$$\delta = \frac{p}{(P-p)x}.$$

Telle était la formule employée dans leurs expériences par Dulong et

Petit. Ils avaient déjà trouvé, par des essais antérieurs, $\frac{1}{6480}$ pour valeur de δ; ils pouvaient donc calculer x.

La connaissance de δ n'est pas nécessaire, à la condition qu'on effectuera une détermination préalable sur le thermomètre à déversement que l'on emploie. Dans ce but, on répète l'expérience que nous venons de décrire en plaçant l'appareil dans la vapeur d'eau bouillante, ce qui revient à plonger le réservoir plein de mercure dans le vase destiné à la fixation du point 100° d'un thermomètre (245). Soit π le poids du mercure déversé, on aura comme précédemment :

$$\frac{\pi}{(P-\pi)\,100} = \delta;$$

on peut donc écrire :

$$\frac{p}{(P-p)x} = \frac{\pi}{(P-\pi)100}, \qquad \text{d'où :} \qquad x = \frac{p}{\pi}\frac{P-\pi}{P-p}\,100.$$

Les températures déterminées à l'aide de ces dernières formules, avec le thermomètre à poids, seront toujours égales à celles que fourniraient, dans les mêmes circonstances, des thermomètres ordinaires à tiges graduées dont les enveloppes seraient formées par une matière de même nature que celle qui forme le réservoir du thermomètre à déversement. L'immersion préalable de ce dernier dans la vapeur d'eau bouillante et l'évaluation de π équivalent à la graduation ordinaire du thermomètre à tige et dispensent de la connaissance de δ.

290. Mesure de la dilatation absolue des liquides autres que le mercure. — Deux méthodes se présentent : on peut employer le thermomètre à poids en déterminant, au préalable, la valeur de K qui convient au verre employé : ce qui est aisé avec le mercure, dont le coefficient de dilatation absolue est actuellement connu. L'équation (1) (289), donnera K en fonction de Δ et en fonction de la température du bain qu'on pourra évaluer directement avec un thermomètre ordinaire. Puis, avec le même vase de verre, on répétera la même opération, en y introduisant le nouveau liquide au lieu du mercure ; on prendra alors pour inconnue dans la même équation (1) la quantité Δ.

291. Méthode des thermomètres comparés. — Une seconde méthode, déjà suivie par Deluc, Gay-Lussac, MM. Biot, Despretz et Muncke, a été employée, en 1844, avec beaucoup de succès, par M. Isidore Pierre, pour déterminer les dilatations absolues d'un grand nombre de liquides. Elle consiste à construire, avec le liquide sur lequel on veut opérer, un thermomètre A tout à fait semblable aux thermomètres ordinaires et à comparer ses indications avec celles d'un bon thermomètre à mercure M placé dans les mêmes conditions. Si les deux thermomètres qu'on compare ont leurs

tiges et leurs réservoirs de même dimension, s'il est possible de les immerger complétement l'un et l'autre dans le même bain, les dilatations absolues du liquide depuis 0° jusqu'à des températures quelconques, seront facilement mesurables. En effet, le thermomètre A étant jaugé comme il a été dit plus haut (283 *bis*), soit V_0 le volume à 0° occupé par le liquide dans son enveloppe vitreuse, V' le volume évalué à 0° qu'il semble occuper à T° (T étant donné par le thermomètre à mercure M); $V'(1 + KT)$ sera le volume réel du vase dilaté; $V_0(1 + \Delta_T)$ sera le volume réel du liquide dilaté contenu dans le vase. On aura donc : $V_0(1 + \Delta_T) = V'(1 + KT)$, d'où $\Delta_T = \frac{V'(1 + KT) - V_0}{V_0}$. Ici, K est le coefficient de dilatation du verre, et Δ_T la dilatation absolue que subit l'unité de volume du liquide en passant de 0° à T°.

Mais il est bien difficile, quand la valeur de T est un peu grande, que le bain, nécessairement assez profond, dans lequel les deux thermomètres doivent être plongés entièrement, présente, en tous ses points, la même température. Il survient alors une complication qui rendrait les résultats obtenus très-incertains. M. Pierre y a obvié de la manière suivante :

Les réservoirs de A et de M sont placés à la même hauteur, à côté l'un de l'autre, dans le bain liquide qui doit les échauffer; les tiges sont plongées dans un même manchon plein d'eau, dont la température est fournie par un thermomètre à mercure *m*; le réservoir de ce dernier instrument est à peu près de même diamètre que les tiges de A et de M. De cette façon, les variations de volume du mercure et du liquide dans les deux thermomètres qu'on compare doivent correspondre bien exactement aux mêmes variations de température. Pour plus de sûreté, dans chaque observation, on avait toujours le soin de maintenir constantes, pendant un quart d'heure au moins, la température du bain et celle de l'eau du manchon, afin de pouvoir observer les déplacements maxima ou minima des deux colonnes liquides dans les thermomètres.

Voici maintenant la marche du calcul; soient :

T la température du bain (nous verrons dans un instant comment on l'obtient);
θ la température de l'eau du manchon donnée par le thermomètre *m*;
V_0 le volume du liquide à 0° dans le thermomètre A;
V'_0 le volume à 0° de la partie du thermomètre A plongée dans le bain;
V''_0 le volume à 0° de la partie du liquide de A plongée dans le manchon;
Δ_T la dilatation de l'unité de volume du liquide de 0° à T;
Δ_θ la dilatation de l'unité de volume du liquide de 0° à θ;
K le coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe de cristal du thermomètre A.

Le volume réel du liquide, s'il était porté tout entier à la température de T°, serait $V_0(1 + \Delta_T)$: or ce volume se compose de deux parties : 1° Du liquide plongé dans le bain dont le volume réel égal à celui du

vase qui le contient est $V'_0(1+KT)$; 2° du liquide plongé dans le manchon qui, possédant à θ° le volume $V''_0(1+K\theta)$, occuperait à T° le volume

$$V''_0(1+K\theta)\left(\frac{1+\Delta_T}{1+\Delta_\theta}\right).$$

On aura donc l'égalité

$$V_0(1+\Delta_T)=V'_0(1+KT)+V''_0(1+K\theta)\left(\frac{1+\Delta_T}{1+\Delta_\theta}\right),$$

d'où

$$1+\Delta_T=\frac{V'_0(1+KT)(1+\Delta_\theta)}{V_0(1+\Delta_\theta)-V''_0(1+K\theta)}.$$

Dans cette expression, T s'estime en consultant le thermomètre M placé à côté de A. Si T_1 est l'indication qu'il fournit et que n soit le nombre des divisions de la tige qui possèdent la température θ de l'eau du manchon, on aura $T=T_1+nK'(T-\theta)$, d'où on déduira T (*). Dans cette égalité K' représente le coefficient de dilatation cubique du cristal qui forme l'enveloppe du thermomètre m.

Δ_θ s'obtenait à l'aide d'un thermomètre qui était construit avec un liquide de même nature que celui de A et qu'on plongeait tout entier dans l'eau du manchon, à côté du thermomètre à mercure m. La méthode simple décrite, en premier lieu, au commencement de ce paragraphe, est alors applicable, et Δ_θ se détermine comme nous l'indiquons pour Δ_T.

V_0, V'_0, V''_0, s'obtenaient par des jaugeages au mercure (283 *bis*); K, K', se déterminaient en construisant au préalable, avec les enveloppes de cristal employées et antérieurement jaugées, des thermomètres à mercure qu'on portait successivement à 0° et à 100°. On avait alors :

$$U_0\left(1+\frac{100}{5550}\right)=U'_0(1+100K),$$

d'où l'on déduisait K. Dans cette égalité, U_0 et U'_0 représentent les volumes évalués à 0° que paraît occuper le mercure dans le thermomètre, aux deux températures extrêmes.

292. **Résultats principaux.** — Voici maintenant les résultats principaux auxquels a conduit cette étude des dilatations absolues des liquides.

I. *Résultats concernant le mercure.* — Pour un même liquide, la dilatation n'est pas exactement proportionnelle à la température, elle croît plus rapidement. Si cette proportionnalité existait, on aurait toujours en nommant Δ_T la dilatation totale de l'unité de volume depuis 0° jusqu'à T° : $\Delta_T=\Delta T$, Δ étant la dilatation de l'unité de volume de 0° à 1°, ou le coefficient de dilatation absolue, c'est-à-dire que Δ serait constant quel que fût T. Or, dans le

(*) La manière dont on obtient l'équation $T=T_1+nK'(T-\theta)$ sera expliquée, à la fin du cours, à propos d'un problème sur la thermométrie.

tableau des nombres obtenus par Dulong et Petit pour le mercure, tableau que nous avons donné (287), on remarque déjà que Δ croît à mesure que T augmente. Cependant, pour ce qui concerne spécialement le mercure, les variations de Δ sont assez faibles. M. Regnault a trouvé que de 0 à 100°, les indications d'un thermomètre à mercure, abstraction faite de l'enveloppe, diffèrent peu de celles d'un thermomètre à air placé dans les mêmes conditions, mais :

à 200° du thermomètre à air, l'indication du thermomètre à mercure serait				202°,782
à 250°	—	—	—	255 ,214
à 300°	—	—	—	308 ,340
à 350°	—	—	—	362 ,160

M. Regnault a reconnu, en outre, que les nombres fournis par les expériences pouvaient se déduire d'une formule empirique de la forme $\Delta_T = aT + bT^2$, dans laquelle les constantes a et b ont été calculées à l'aide de deux expériences où l'on avait obtenu :

$$\text{Pour } T = 150^\circ \ldots\ldots\ldots\ldots \Delta_T = 0{,}027419$$
$$\text{Pour } T = 300^\circ \ldots\ldots\ldots\ldots \Delta_T = 0{,}055973$$

on en a déduit les deux équations du premier degré, à deux inconnues :

$$0{,}027419 = a \times 150 + b\,\overline{150}^2$$
$$0{,}055973 = a \times 300 + b\,\overline{300}^2$$

d'où l'on tire $a = 0{,}000179$ et $b = 0{,}00000002522$, et, par suite, l'équation générale qui donne la dilatation générale du mercure pour une valeur quelconque de T sera :

$$\Delta_T = 0{,}000179T + 0{,}00000002522T^2.$$

II. *Résultats concernant les liquides autres que le mercure.* — Pour les liquides autres que le mercure, la loi de la dilatation s'écarte encore davantage de la proportionnalité simple. On est obligé de prendre une formule à trois termes,

$$\Delta_T = aT + bT^2 + cT^3$$

dont on détermine les coefficients, comme précédemment, à l'aide des données fournies par trois expériences. On nomme coefficient moyen de dilatation le quotient $\frac{\Delta_T}{T}$; ce coefficient, qu'il faut prendre dans les applications, change évidemment de valeur selon la température à laquelle on opère. Il vaut encore mieux introduire dans les calculs les valeurs de Δ_T qu'on peut déduire de la formule empirique se rapportant au liquide employé.

M. Pierre a mesuré avec un grand soin la dilatation absolue de plusieurs liquides qu'on étudie en chimie organique. Voici quelques-uns de ses résultats :

	COEFFICIENT MOYEN à la température d'ébullition.	TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION.
Alcool ordinaire........	0,001195	78°
Éther ordinaire........	0,001647	36°
Chloroforme...........	0,001320	63°
Aldéhyde..............	0,001827	22°

III. *Comparaison du point d'ébullition de quelques liquides organiques et de leur coefficient de dilatation.* — Quand on compare les liquides l'un à l'autre, au point de vue de leur dilatation, on trouve que chacun suit une loi différente et que les coefficients de la formule empirique qui peut servir à calculer les dilatations de l'unité de volume, de 0 à T°, changent avec chaque liquide. Il est même difficile, en comparant les résultats numériques que l'on a trouvés, de saisir une relation entre la dilatation d'un liquide et ses autres propriétés physiques. Cependant, quand on range les composés en séries continues comprenant chacune un certain nombre de corps analogues qui se ressemblent par leur origine et par leurs réactions, on reconnaît que, dans un groupe donné, la dilatation des composés qu'il renferme augmente, à mesure que le point d'ébullition descend. Ainsi, quand on examine, sous ce point de vue, les alcools monoatomiques dont la formule chimique se rapporte au type $C^{2n}H^{2n}O^2$, tels que l'esprit de bois, l'alcool vinique, l'alcool propylique, etc. ; les points d'ébullition vont en s'élevant, à partir de l'esprit de bois, tandis que les coefficients moyens de dilatation, pris à cette température d'ébullition, vont en diminuant.

293. Dilatabilité des liquides qui entrent en ébullition à une basse température. — La dilatabilité des liquides, qui augmente à mesure que la température s'élève, suit un accroissement encore plus marqué, quand on étudie ces corps à une distance assez grande de leur point d'ébullition.

M. Drion a récemment publié, sur cette question, des recherches très-intéressantes qui ont conduit à ce résultat curieux : que pour les liquides très-volatils, les coefficients de dilatation peuvent dépasser de beaucoup la valeur de ceux qui se rapportent à l'air et aux gaz. M. Thilorier avait, dès 1835, entrevu la grande dilatation que subit l'acide carbonique liquide en passant de 0° à 30° ; il l'estimait égale à *quatre fois* la dilatation de l'air placé dans les mêmes conditions. La réalité d'un fait si extraordinaire avait été mise en doute par quelques physiciens ; les expériences de M. Drion ne peuvent plus laisser aucune incertitude, elles ont porté sur trois liquides très-volatils, de nature très-différente : l'éther chlorhydrique, l'acide hypoazotique et l'acide sulfureux. Pour le premier, c'est vers

110 degrés que le coefficient de dilatation atteint la valeur de celui de l'air; à 130°, il est trois fois plus grand. Pour l'acide hypoazotique, à 110°, le coefficient de dilatation est supérieur à celui de l'air. Enfin, pour l'acide sulfureux, c'est vers 80° que l'égalité des deux coefficients est atteinte. A 130°, le coefficient se rapportant à l'acide sulfureux est triple de celui de l'air.

M. Drion ne donne, il est vrai, dans son travail, que les dilatations apparentes ; mais, comme elles sont toujours plus faibles que les dilatations absolues, la loi qu'il a voulu dégager se trouve mise en évidence d'une manière encore plus nette.

294. **Phénomènes particuliers présentés par l'eau.** — La loi de dilatation de l'eau ne ressemble en rien à celle qui appartient aux autres liquides. L'eau présente cette propriété singulière que si l'on observe son volume à partir de 0°, on le voit décroître à mesure que la température s'élève jusqu'à 4° environ. A partir de 4°, le volume croît de nouveau, si bien que vers 8°, l'eau reprend sensiblement le même volume qu'elle avait à 0°; il y a donc, à 4°, un minimum de volume ou un maximum de densité.

295. **Maximum de densité de l'eau. — Expérience de Hope.** — L'existence d'un maximum de densité pour l'eau se démontre par l'expérience suivante qui est due à Hope. Une éprouvette à pied en verre (*fig.* 162), porte, vers le premier tiers supérieur, un manchon de verre M dans lequel on a introduit, soit de la glace pilée, soit un mélange réfrigérant. Deux thermomètres sont fixés horizontalement, à l'aide de bouchons, dans des ouvertures circulaires pratiquées à la paroi de l'éprouvette, de telle façon que les réservoirs sphériques correspondent à l'axe du cylindre. L'un des thermomètres t est placé vers la partie supérieure, l'autre t' vers la partie inférieure de l'appareil. En remplissant l'éprouvette d'eau et l'abandonnant à elle-même, on reconnaît que les deux thermomètres marquent une température décroissante ; mais bientôt le thermomètre inférieur atteint une température stationnaire voisine de 4°, tandis que le thermomètre supérieur indique une température décroissante. Ce résultat s'explique ainsi : l'eau de l'éprouvette, qui avait primitivement une température de 10° par exemple, devient plus froide, et par suite plus dense, en raison de sa proximité avec la glace pilée du manchon ; elle se précipite au fond et fait baisser le thermomètre inférieur t'. Ce phénomène se continue jusqu'au moment où les couches inférieures, qui ne cessent de se refroidir, ont atteint leur maximum de densité et transmis au thermomètre t' leur

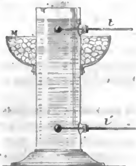


Fig. 162.

propre température. Mais, à partir de ce moment, la masse d'eau est abaissée au-dessous de 4° dans le voisinage de M. La densité de l'eau est moindre dans cette région que dans le fond de l'éprouvette, les couches liquides ne peuvent plus descendre, pour refroidir le thermomètre t' qui gardera désormais une température invariable, celle du maximum de densité. Quant au thermomètre supérieur, il marque la température décroissante des couches d'eau qui baignent son réservoir.

296. **Diverses méthodes pour obtenir la température du maximum de densité de l'eau.** — Ce procédé, excellent pour prouver l'existence du maximum de densité de l'eau, ne pourrait fournir la valeur numérique exacte de la température qui lui correspond. Cette valeur est cependant d'une grande importance, puisqu'on a pris, comme unité de poids, le poids d'un centimètre cube d'eau distillée, à son maximum de densité. Lefèvre-Gineau, qui fut chargé de donner l'étalon du kilogramme, à l'époque où l'on adopta le système des nouvelles mesures, pesait un même cube métallique, dans l'eau pure portée successivement à diverses températures. C'est évidemment à l'instant où la poussée du liquide est le plus forte, c'est-à-dire où le poids du cube est le plus diminué, que la température du maximum de densité est atteinte par l'eau. Il trouva ainsi le nombre 4°,4.

Haellstroem, par une méthode semblable, en pesant dans l'eau une boule de verre convenablement lestée, obtint 4°,1 ; il construisit une table qui donne le volume de l'eau et sa densité de degré en degré, depuis 0° jusqu'à 30° centigrades.

Il y a dans les recherches du genre de celles que nous indiquons ici, une difficulté inhérente à leur nature même. La densité de l'eau varie avec la température, ou, comme on le dit en mathématiques, est fonction de la température. Or, dans le voisinage d'un maximum ou d'un minimum, une fonction varie très-peu, pour des changements cependant notables, dans la valeur de la variable. Ainsi, dans le voisinage de 4°, le changement de poids du cube métallique employé par Lefèvre-Gineau ou de la boule lestée de Haellstroem était à peu près inappréciable, quand la température changeait de quelques dixièmes de degré.

297. **Expérience de M. Despretz.** — M. Despretz, en 1839, a mis en œuvre un procédé, dans lequel la difficulté que nous venons de signaler n'est pas sans doute complétement écartée, mais où l'opérateur se trouve placé dans des conditions plus favorables, pour effectuer des mesures exactes. Cette fois, en effet, on estime le volume occupé par l'eau, non plus à 4°, mais à des distances assez grandes au delà et en deçà de ce point, et, des nombres obtenus, on parvient à déduire la température du maximum de densité, ou, ce qui revient au même, du minimum de volume.

M. Despretz plonge dans un même bain, dont la température pourra varier, depuis — 9° jusqu'à + 10 ou + 15 degrés, deux thermomètres à eau

juxtaposés chacun à un thermomètre à mercure bien réglé. Les tubes des thermomètres à eau ont été divisés en parties d'égale capacité, et le volume de chaque division, ainsi que celui du réservoir qui leur correspond, évalués avec soin. Le coefficient de dilatation cubique du verre qui forme les thermomètres, a été déterminé par la méthode indiquée plus haut (277). Enfin, les deux thermomètres ont été remplis d'eau parfaitement pure et récemment bouillie pour qu'elle ne renferme pas d'air en dissolution. Dans ces conditions, on note soigneusement les volumes apparents de l'eau dans les enveloppes vitreuses aux diverses températures; soient :

$$V_0 \text{ à } 0^o$$
$$V_t \text{ à } t$$
$$V_{t'} \text{ à } t'.$$

Si le volume V_0 à 0° est devenu à t^o (en faisant une lecture sur la tige graduée du thermomètre) V_t, le volume 1 serait devenu :

$$\frac{V_t}{V_0} \text{ à } t^o, \quad \frac{V_{t'}}{V_0} \text{ à } t'^o, \text{ etc.}$$

D'autre part, l'unité de volume du réservoir s'est accrue effectivement de :

$$\frac{V_t}{V_0} Kt \text{ à } t^o, \quad \frac{V_{t'}}{V_0} Kt' \text{ à } t'^o, \text{ etc.}$$

Pour avoir les volumes vrais de l'eau aux divers degrés marqués par le thermomètre à mercure, il faudra ajouter, aux volumes apparents, les accroissements de capacité de l'enveloppe vitreuse. Les volumes vrais du liquide seront donc :

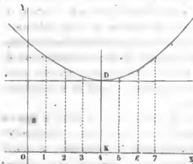


Fig. 163.

$$\frac{V_t}{V_0} + \frac{V_t}{V_0} Kt \text{ à } t^o$$
$$\frac{V_{t'}}{V_0} + \frac{V_{t'}}{V_0} Kt' \text{ à } t'^o, \text{ etc.}$$

Cela posé, menons les lignes OX, OY qui se coupent, à angle droit, au point O. A partir de ce point, prenons sur OX des longueurs proportionnelles aux températures t, t', t'', etc., et, par les points de division, menons à OX des perpendiculaires, dont les longueurs soient proportionnelles aux volumes vrais dont nous venons de donner l'expression générale; joignons les extrémités de ces perpendiculaires par une ligne continue : nous aurons,

par la courbe ainsi tracée, la représentation graphique de la loi qui lie le volume de l'eau à sa température, dans le voisinage de 4°. Il ne restera plus qu'à mener une tangente à cette courbe parallèlement à la ligne OX. La distance de cette tangente à OX sera évidemment la valeur du volume minimum absolu de l'eau, et, en abaissant une perpendiculaire du point de contact D à la ligne OX, nous aurons, par la longueur OK interceptée sur OX, l'expression numérique de la température correspondante au minimum de volume. M. Despretz a ainsi trouvé 4° environ.

Il a reconnu, en outre, que dans un thermomètre à eau, l'eau privée d'air pouvait supporter un abaissement de température d'environ — 20°, sans qu'il y eût congélation; en outre, l'augmentation de volume qui commence à 4° se continuait jusqu'au moment de la solidification.

298. **Maximum de densité des dissolutions salines.** — Les dissolutions salines présentent toutes, à cause de l'eau qu'elles renferment, un maximum de densité; mais la température à laquelle il se produit est le plus souvent inférieure au point de congélation de ces dissolutions abandonnées à elles-mêmes à l'air libre; cette particularité rend plus difficiles la constatation du maximum de densité, et surtout la fixation de la température qui lui correspond.

SECTION III

Dilatation des gaz.

299. **Coefficient de dilatation des gaz. — Méthode de Gay-Lussac. —** La mesure exacte du coefficient de dilatation des gaz présente un grand intérêt à cause de l'emploi fréquent de cette donnée numérique, soit pour passer du volume d'un gaz, dans des conditions déterminées de température, à son poids absolu, soit pour utiliser les gaz, comme substance thermométrique, à de hautes températures.

Gay-Lussac, un des premiers, détermina avec soin le coefficient de dilatation de l'air et le nombre qu'il avait obtenu a été, pendant longues années, le seul adopté par les physiciens. Voici sa méthode : Un appareil ayant la forme d'un thermomètre était constitué par un ballon d'une assez grande capacité R (*fig.* 164), destiné à contenir l'air et par un tube de diamètre étroit divisé en parties d'égal volume; ce tube, soudé au col du bal-

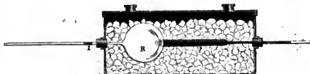


Fig. 164.

lon, servait à rendre plus exacte la mesure de l'accroissement de volume pris par la masse d'air. Le ballon et le tube avaient été jaugés à l'avance par la méthode ordinaire (283 *bis*), en évaluant le poids du mercure qui les remplissait à 0°. — Il fallait d'abord introduire de l'air sec dans le ballon. A cet effet, on remplissait l'appareil, de mercure qu'on faisait bouillir, comme pour construire un thermomètre, afin de chasser l'air adhérent aux parois; au tube était alors adapté un manchon cylindrique en verre un peu plus large que lui et renfermant du chlorure de calcium pour absorber l'humidité. Avec un fil de fer ou de platine qu'on introduisait dans le tube étroit, et en donnant de petites secousses, on faisait sortir goutte à goutte le mercure de l'appareil; c'était l'air desséché contenu dans le manchon qui le remplaçait. On ne laissait qu'un petit index destiné à isoler, de l'air ambiant, la masse gazeuse qui devait se dilater.

Ces précautions prises, l'appareil était placé horizontalement dans une caisse rectangulaire en cuivre M (*fig.* 164) pleine de glace fondante et à côté d'un thermomètre à mercure *t*. Les tiges des deux instruments traversaient les parois latérales afin de rendre visibles leurs indications. L'air sec, ainsi amené à 0°, prenait un volume fixe V_0 qu'on estimait par la position de l'index I dans le tube. On notait au même moment l'indication H du baromètre. La glace était enlevée et remplacée par l'eau qu'on portait à la température T de l'ébullition; l'air se dilatait, chassait l'index devant lui, et, pour que toute la masse gazeuse fût bien à la même température T, on faisait glisser le thermomètre à air, en l'enfonçant vers l'intérieur de la caisse, pour maintenir l'index au niveau de la paroi latérale; on notait la nouvelle position de l'index qui correspondait cette fois au volume apparent de l'air V_T, et on inscrivait, en même temps, l'indication actuelle du baromètre H'. Pour déduire, de cette expérience, le coefficient de dilatation α du gaz, remarquons que le volume d'air V_0 eût pris à T un volume absolu $V_0(1+\alpha T)$, si la pression fût demeurée égale à H; comme elle devient H', l'air doit avoir pris le volume $V_0(1+\alpha T)\frac{H}{H'}$: voilà le volume du gaz à T°. Or, le volume du vase dilaté qui le contient a pour expression $V_T(1+KT)$, expression où K désigne le coefficient de dilatation du verre. On a donc :

$$V_0(1+\alpha T)\frac{H}{H'} = V_T(1+KT),$$

d'où

$$\alpha = \frac{V_T(1+KT)\frac{H'}{H} - V_0}{V_0 T}.$$

On recommence la même expérience, en portant le gaz à une autre tem-

pérature T', à une troisième T'', et on retrouve pour α la même valeur.

Gay-Lussac a trouvé ainsi $\alpha = 0{,}00375$, Lambert avait déjà obtenu le même résultat, et Dalton avait donné pour valeur de α le nombre 0,00392.

300. **Expériences de Rudberg.** — Rudberg, physicien suédois, a le premier soupçonné l'inexactitude de ces nombres. Il a repris la même détermination, par un procédé déjà employé par Dulong et Petit. Il est arrivé à une valeur notablement plus faible 0,003646. Rudberg a montré, dans ces mêmes essais, combien était grande l'influence exercée par la présence de la vapeur d'eau dans l'air ; car avec de l'air non desséché, il a obtenu les nombres 0,00384 et 0,00390.

On le voit, il existait un grand désaccord entre les valeurs que les différents physiciens avaient trouvées pour α ; et le désaccord était d'autant plus fâcheux qu'il concernait, non-seulement la dilatation de l'air atmosphérique, mais encore celle de tous les autres gaz. Gay-Lussac était arrivé, en effet, à la suite de déterminations analogues à la précédente, effectuées sur plusieurs substances gazeuses, à cette loi générale que les expériences de Davy, de Dulong et de Petit avaient confirmée : *Tous les gaz ont le même coefficient de dilatation, et ce coefficient est indépendant de la pression qu'ils supportent.* Il était donc très-important de tenter des expériences nouvelles, par des procédés variés qui pussent se contrôler l'un l'autre.

301. **Méthode de M. Regnault.** — C'est M. Regnault qui s'est chargé de ce soin. Il a d'abord signalé les causes principales d'erreurs inhérentes à la méthode de Gay-Lussac, qu'il a essayée lui-même, afin de pouvoir se rendre un compte exact de ses inconvénients. Le défaut le plus grave qu'il lui a reconnu, c'est que l'index de mercure, qui fait dans le tube du thermomètre à air l'office de piston, ne bouche pas hermétiquement le tube ; il laisse entrer ou sortir une petite quantité d'air. M. Regnault a mis cette imperfection en évidence, en faisant varier la température du gaz d'abord de 0 à 100°, pour la ramener ensuite à 0° ; l'index n'a jamais repris exactement sa position initiale. Il y a donc une variation notable de la masse gazeuse soumise à l'expérience, variation qui affecte les résultats calculés d'une erreur permanente.

Faut-il abandonner la méthode de Gay-Lussac ou faut-il l'améliorer? Avant de décider cette question, il est bon d'examiner quels sont les divers procédés qui peuvent être mis usage.

La formule (d) (266) a donné :

$$V_{t'} = V_t \left(\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}\right) \frac{H}{H'}.$$

Le coefficient de dilatation des gaz s'y trouve exprimé, en fonction du volume et de la pression. Si, dans les expériences propres à déterminer ce coefficient, on fait varier à la fois ces deux quantités, $V_{t'}$, V_t, H' et H pourront

être obtenus numériquement, en même temps que t et t', et l'application de la formule que nous venons d'écrire donnera α. C'est le cas de l'expérience de Gay-Lussac; et il est, comme on le voit, assez complexe.

On pourra, en second lieu, par une autre disposition, conserver au gaz qui se dilate la même pression, pendant toute la durée de l'expérience. Alors $H' = H$; et α se tirera de l'équation :

$$\frac{V_{t'}}{V_t} = \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

M. Pouillet s'est servi d'un procédé qui avait ce principe pour point de départ.

Enfin, on peut laisser le volume constant; à toutes les époques de l'expérience, et se borner à des mesures de pression. Alors le problème est résolu par l'égalité $\frac{H}{H'} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}$. (a)

Cette dernière expression représente le point de départ théorique de la plus importante, à notre avis, des quatre méthodes employées par M. Regnault, la seule que nous voulions décrire ici.

302. **Construction de l'appareil.** — L'appareil de M. Regnault se compose d'un ballon de verre B plein d'air (*fig.* 165) de 800 à 1000 centimètres cubes de capacité, portant, soudé à son col, un tube de diamètre étroit de 20 centimètres de longueur environ. Ce tube est mastiqué dans un autre tube de cuivre C à trois branches qui met le ballon en communication : 1° par la branche D avec l'appareil manométrique MM' déjà décrit (189); 2° par la branche I avec un appareil de dessiccation pour les gaz, puis avec la machine pneumatique. Le tube manométrique M porte dans le voisinage de sa soudure avec D un trait b qui limite le volume invariable que doit occuper le gaz qui remplira le ballon et le tube de jonction, dans les diverses phases de l'expérience. Enfin, une chaudière à couvercle double sert à porter le réservoir B aux diverses températures que l'on veut produire. La vapeur d'eau, avant de s'échapper dans l'air extérieur, circule autour de l'enveloppe centrale et empêche son refroidissement. De cette façon, il suffit de consulter le baromètre au moment où l'eau bout dans la chaudière, ainsi que la table des forces élastiques maxima de la vapeur d'eau, pour en conclure la vraie température de l'air du ballon.

303. **Marche des expériences.** — Voici la manière d'opérer. Le ballon a été d'avance jaugé exactement avec l'eau distillée, les tubes de jonction C et D jusqu'au trait b ont été jaugés au mercure, leur capacité v ne doit être qu'une très-petite fraction de celle V_t du ballon : dans l'expérience de M. Regnault on avait $\frac{v}{V} = 0{,}002715$. Ces mesures effectuées, il faut remplir le ballon d'air sec. Dans ce but, par l'intermédiaire du tube I, on fait le

vide dans l'intérieur de l'appareil, après avoir d'avance rempli de mercure une portion des tubes M et M'. Pour que l'humidité adhérente aux parois



Fig. 165.

intérieures du réservoir B disparaisse bien complétement, on porte l'eau de la chaudière à l'ébullition ; on laisse rentrer de l'air sec ; on fait de nouveau le vide. Après plusieurs opérations de ce genre, on peut être sûr que le réservoir ne contient plus que de l'air bien sec. On verse alors dans le tube M' du manomètre, assez de mercure pour que le niveau de ce liquide affleure dans le tube M au trait *b*. A ce moment, les deux niveaux en M et en M' sont sur le même plan horizontal, puisque l'air du ballon communique librement avec l'atmosphère, par l'intermédiaire du tube I ; on note alors l'indication H du baromètre. Le volume de l'air sec est connu, c'est le volume du ballon plus celui du tube de jonction jusqu'en *b* ; la température T est celle de la vapeur de l'eau bouillante ; la pression est H. Avec le dard du chalumeau, on fond l'extrémité du tube I de manière à le clore exactement.

Dans la seconde période de l'expérience, l'eau bouillante est remplacée par de l'eau froide, puis finalement par de la glace fondante. L'air, en se

refroidissant, se contracte, et le mercure monterait dans le tube D, si l'on n'y mettait obstacle; mais on maintient son niveau en b, en laissant écouler du mercure par le robinet R. Enfin, quand la température de l'air est devenue 0°, on note de nouveau l'indication barométrique H'; et soit avec une échelle graduée, soit avec un cathétomètre, on prend la distance verticale h des niveaux du mercure dans les deux branches du manomètre. Dans les deux cas, la masse d'air n'a pas changé, son volume apparent est le même, la température a varié de T à 0° et la pression de H à $H'-h$. Il ne reste plus, pour avoir α, qu'à introduire ces données dans l'équation (a).

304. **Calcul de l'expérience.** — Mais il se présente une petite complication : 1° Le ballon n'a pas conservé exactement le même volume dans les deux cas ; 2° les tubes de jonction G et D contenaient de l'air qui, au lieu de se trouver aux températures T° et 0°, peut être considéré comme demeuré à la température t de l'air extérieur, température donnée d'ailleurs par un thermomètre à mercure placé dans le voisinage de ces tubes.

Si, dans la première phase, le volume v de l'air du tube de jonction, au lieu d'être à t°, eût été à T°, sans changer de pression, il serait devenu

$$v\frac{1+\alpha T}{1+\alpha t},$$

et le volume total de la masse gazeuse à la même température T eût été

$$V(1+KT)+v\frac{1+\alpha T}{1+\alpha t}.$$

Dans la seconde phase, si l'air du tube de jonction, au lieu d'être à t, eût été à 0°, son volume serait devenu $\frac{v}{1+\alpha t}$ sans changement de pression, et le volume total de la masse gazeuse à 0° eût été $V+\frac{v}{1+\alpha t}$. Si l'on applique alors la formule générale (d) (266) qui lie les volumes d'un gaz à sa température et à sa pression, on aura :

$$\frac{V(1+KT)+v\frac{1+\alpha T}{1+\alpha t}}{V+\frac{v}{1+\alpha t}}=(1+\alpha T)\frac{H'-h}{H},$$

d'où

$$1+\alpha T=\frac{(1+KT)H}{H'-h+\frac{v}{V}\left\{\frac{1}{1+\alpha t}(H'-H-h)\right\}};$$

α entre, il est vrai, dans les deux membres de cette formule ; mais on remarquera que $\frac{v}{V}$ est très-petit, comme nous l'avons dit plus haut, que par

suite, le terme qui contient ce facteur est négligeable dans une première approximation. On calculera donc une première valeur de α à l'aide de la relation :

$$1 + \alpha T = \frac{(1 + KT)H}{H' - h};$$

puis, la valeur trouvée ainsi pour α sera substituée à la place de α dans le second membre; on en conclura une nouvelle valeur de $1 + \alpha T$ plus approchée que la précédente; et on continuera ainsi, jusqu'à ce qu'on obtienne deux valeurs consécutives de α ne différant l'une de l'autre que d'une quantité négligeable: c'est la méthode des approximations successives fréquemment utilisée en physique. La valeur du coefficient K contenue dans la formule avait été estimée à l'avance par M. Regnault en opérant directement, comme il a été dit (277), sur un ballon plus petit fait du même verre; elle était égale à 0,0000233.

305. **Résultats généraux.** — M. Regnault a obtenu comme moyenne de six déterminations $\alpha = 0{,}003665$ ou $\frac{1}{273}$. Si l'on admet que de 0° à 100°, la dilatation totale de l'unité de volume de l'air soit 0,36666, on pourra prendre dans les calculs, la fraction ordinaire équivalente $\frac{11}{30}$.

306. I. *Influence de la nature du gaz.* — M. Regnault a appliqué ses procédés, aux gaz autres que l'air atmosphérique; il est arrivé ainsi aux conclusions suivantes : « 1° Les différents gaz présentent des coefficients de dilatation très-notablement différents. 2° L'on n'obtient pas la même valeur pour ces coefficients, suivant qu'on les détermine par l'observation directe de l'augmentation de volume que subit une même masse de gaz dont la force élastique reste constante, ou suivant qu'on la déduit par le calcul, comme dans l'expérience précédente, de l'observation des forces élastiques que présente un même volume de gaz dont on élève la température. » — Voici les nombres obtenus pour l'expression du coefficient de dilatation moyen entre 0° et 100°.

	Sous volume constant.	Sous pression constante.
Hydrogène	0,3667	0,3661
Air atmosphérique	0,3665	0,3670
Azote	0,3668	»
Oxyde de carbone	0,3667	0,3669
Acide carbonique	0,3688	0,3710
Protoxyde d'azote	0,3676	0,3719
Acide sulfureux	0,3845	0,3903
Cyanogène	0,3829	0,3877

307. II. *Influence de la pression.* — Davy avait annoncé, comme conséquence de ses expériences, que la dilatation de l'air était indépendante de sa pression ou de sa densité. Ce résultat méritait d'être vérifié. M. Re-

gnault a opéré sur l'air, tantôt à des pressions plus faibles que la pression moyenne de l'atmosphère $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$... d'atmosphère, tantôt à des pressions plus fortes jusqu'à 4 et 5 atmosphères, et toujours il a reconnu que : « L'air se dilate, entre les mêmes limites de température, de quantités qui sont d'autant plus considérables que la densité du gaz est plus grande; ou, en d'autres termes, que ses molécules sont plus rapprochées. » Des essais du même genre ont été faits sur les autres gaz et ont conduit toujours au même résultat. Pour l'acide carbonique en particulier, la valeur de 100 α qui est

0,3685 quand la densité du gaz est 1,

devient

0,3752 — — 2,2976

et

0,3859 — — 4,7318

308. Conclusions générales. — Une conséquence générale ressort des nombreuses évaluations numériques faites par M. Regnault : c'est que les coefficients de dilatation des différents gaz se rapprochent d'autant plus de l'égalité, qu'on étudie individuellement ces gaz à des pressions plus faibles. La loi de Gay-Lussac, d'après laquelle le coefficient de dilatation est le même pour tous les gaz, serait donc vraie, si l'on possédait les substances gazeuses dans un état d'expansion ou d'écart moléculaire, tel que l'influence de l'attraction moléculaire fût négligeable.

Notons avec soin, deux autres conclusions importantes qui se déduisent des expériences de M. Regnault : 1° *quoique l'air possède un coefficient de dilatation variable avec la pression, cependant la loi de sa dilatation demeure la même de 0° à 350° quand bien même on fait varier la force élastique initiale de 0m,4 à 1m,3.*

2° *Entre les mêmes limites de température, l'hydrogène, l'air et l'acide carbonique présentent la même loi de dilatation ; si bien qu'il est possible de les employer indifféremment l'un ou l'autre, à la construction des pyromètres destinés à la mesure des températures élevées, à la condition pourtant que, dans les calculs que nécessitera cette mesure, on se serve du coefficient de dilatation propre au gaz employé.*

SECTION IV

Applications des dilatations.

309. Pressions développées par les corps solides, au moment de leur dilatation et de leur contraction. — On peut tirer parti de la dilatation

ou de la contraction des verges métalliques pour exercer de très-grandes pressions. Les pierres qui forment le dôme de Saint-Pierre, à Rome, tendaient à se disjoindre ; on parvint à les rapprocher, en enfonçant, à grands coups de marteau, des cercles de fer qu'on portait au rouge. La contraction du fer, pendant le refroidissement, développa une pression suffisante pour ramener les pierres à leur position primitive. Un exemple numérique fera encore mieux comprendre la grandeur de la force mise en jeu, quand on échauffe un corps solide. Soit une barre de fer d'une longueur de $8^m,19$ à $0°$ et de 1 centimètre carré de section, encastrée entre deux massifs en maçonnerie ; si l'on élève sa température de $10°$, on voit, d'après la valeur du coefficient de dilatation linéaire donné (278) : $\frac{1}{81900}$, que l'allongement de la barre serait de 1 millimètre exactement, si elle était libre. Or, si les obstacles qui lui sont opposés sont absolument fixes et l'obligent à conserver sa longueur primitive ; il est clair que l'effort exercé contre ces obstacles au moment de la dilatation du métal, sera égal à celui qu'il faudrait employer pour raccourcir la même barre de 1 millimètre.

Cet effort déduit de la valeur du coefficient d'élasticité du fer est de 250 kilogrammes environ. Pour une élévation de température de $100°$, il deviendrait égal à 2500 kilogrammes.

310. **Thermomètre métallique.** — L'inégale dilatation des métaux a été mise à profit, pour construire des thermomètres d'une grande sensibilité. Soudez ensemble deux tiges prismatiques de zinc et de cuivre ayant même longueur à $10°$ (*fig.* 166) ; fixez-les, par une extrémité, à un support S et faites agir l'autre extrémité sur le petit bras d'un levier, qui est mobile autour d'un axe O et dont le grand bras constitue une aiguille mobile sur un cadran divisé. La dilatation du zinc est plus grande que celle du cuivre ; si donc la température vient à s'élever au-dessus de $10°$, le système des deux verges ne pourra pas se conserver rectiligne. Il s'infléchira de manière à ce que le métal le plus dilatable, le zinc, se trouve à la convexité et puisse prendre la longueur plus grande qui convient à son coefficient de dilatation. L'aiguille, en se déplaçant alors dans le sens de la flèche f, indiquera, par sa nouvelle position sur le cadran, l'élévation de température produite. On comprend, en même temps, la possibilité d'obtenir une graduation empirique ; il suffira de porter l'appareil dans plusieurs milieux

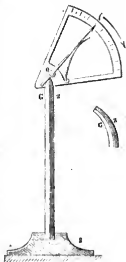


Fig. 166.

de température connue, et d'inscrire sur le cadran, au point où l'aiguille s'arrêtera, le degré indiqué par un thermomètre à mercure placé dans les mêmes conditions.

311. **Thermomètre métallique de Bréguet.** — Bréguet a augmenté la sensibilité du thermomètre métallique, en lui donnant la forme d'un ruban très-étroit et très-mince contourné en spirale; par cette disposition, l'appareil, sous une assez grande longueur, n'occupe, en définitive, que très-peu de place. Ce ruban est formé de deux lames minces de platine et d'argent soudés ensemble à l'aide d'une lame d'or intermédiaire. — L'or possède précisément une dilatation comprise entre celles des deux autres métaux. — La spirale est fixée par un bout à un support fixe; à l'autre extrémité, se trouve adaptée une aiguille qui se meut sur un cadran horizontal divisé. Les moindres variations de température font changer à la fois la courbure dans tous les points du ruban métallique, et l'aiguille marche sous l'action combinée de toutes les spires. Une graduation par comparaison peut d'ailleurs être effectuée, comme dans l'appareil précédent. La sensibilité de ce petit instrument est telle qu'il suffit de retirer une tige centrale en cuivre qui est placée dans l'axe de la spirale, de la chauffer un instant avec la main et de la replacer dans sa position primitive, pour que l'aiguille se déplace sur le cadran, d'une quantité très-notable.

Mais la sensibilité ne suffit pas pour qu'un appareil thermométrique soit acceptable; il faut avant tout, que soumis aux mêmes influences, il reproduise constamment les mêmes indications. Or, l'inconvénient commun à tous les thermomètres métalliques, quelle qu'en soit la forme, c'est la grande variabilité dans l'état moléculaire des corps solides employés à leur construction, variabilité qui empêche ces instruments de demeurer comparables à eux mêmes.

312. **Pendule compensateur.** — Une application plus importante de la dilatation inégale des métaux, c'est la compensation introduite dans le pendule des horloges. Nous avons vu (68) que la durée de l'oscillation varie proportionnellement à la racine carrée de la longueur du pendule. En hiver, le pendule se contracte, l'horloge avance; en été, il s'allonge, l'horloge retarde. Il fallait associer les verges métalliques choisies pour constituer la tige du pendule, de telle façon qu'au moment d'une élévation de température, l'une d'elles pût faire remonter la lentille du pendule d'une quantité égale à celle dont l'autre l'eût fait descendre si elle avait agi isolément. Si une pareille condition est réalisée, il est évident que la longueur d'oscillation demeurera invariable.

Parmi les nombreux modes de compensation qui ont été proposés, nous choisirons le plus communément adopté, celui du pendule à gril. Il se compose de quatre cadres rectangulaires incomplets, alternativement en fer et en laiton, portés par des traverses et disposés comme l'indique la fi-

gure 167. On voit de suite qu'en se dilatant, le fer, s'il agissait seul, ferait descendre le centre de gravité o' de la lentille, tandis que le laiton, par son allongement, le ferait remonter. Les lettres a, b, c, d indiquent les longueurs totales des verges de fer placées d'un même côté, a' et b', celles du laiton.

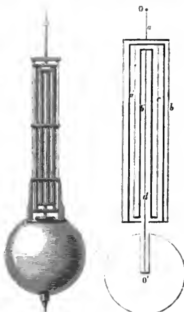


Fig. 167.

La compensation aura lieu si, pour une élévation de température t, les accroissements de longueur du fer et du laiton demeurent égaux : c'est-à-dire, qu'en appelant K et K' les coefficients de dilatation du fer et du laiton, on devra avoir :

$$(a + b + c + d)\,Kt = (a' + b')\,K't,$$

cette première égalité mise sous la forme,

$$\frac{a + b + c + d}{a' + b'} = \frac{K'}{K}$$

montre : que la compensation sera possible, en adoptant la disposition indiquée par la figure, toutes les fois que l'on aura $K' > K$. Cette condition se trouve précisément réalisée lorsqu'on emploie le fer et le laiton. Or, soit L la longueur du pendule, on a évidemment

$$L = a + b + d - c \quad \text{ou} \quad L + c = a + b + d;$$

substituant, il vient :

$$(L + 2c)\,K = (a' + b')\,K'.$$

Mais, d'après la construction indiquée par la figure, la longueur c de la tige de fer est une moyenne entre les longueurs a' et b' des deux tiges de laiton

$$c = \frac{a' + b'}{2} \quad \text{ou} \quad 2c = a' + b', \quad \text{on a donc :} \quad (L + (a' + b'))\,K = (a' + b')K'.$$

ou

$$L = (a' + b')\,\frac{K' - K}{K};$$

si l'on remplace K' et K par leurs valeurs 0,0000188 et 0,0000122 : le calcul donne $(a' + b') = 1,848$. L.

Un pendule qui bat la seconde à Paris, a pour longueur 994 millimètres. Les verges de laiton devraient donc avoir ensemble, dans ce cas, une longueur totale de $1,848 \times 994^{mm} = 1^{m},836$ ou bien la plus longue $0^{m},933$ et l'autre $0^{m},903$. Dans la pratique, un semblable calcul ne doit être considéré que comme approximatif; car, le poids des cadres ne permet pas de considérer le centre d'oscillation comme se confondant avec le centre de gravité de la lentille.

313. **Correction barométrique.** — Nous avons déjà dit (152) que, pour représenter la pression atmosphérique par une hauteur de colonne de mercure, il faut ramener ce liquide à une température déterminée, toujours la même. On a choisi la température 0°. La question est donc celle-ci : la hauteur barométrique observée à $t°$ étant h_t, quelle eût été la hauteur observée h_0, si le mercure avait été à 0° ? Supposons deux baromètres plongeant dans la même cuvette, l'un abandonné à l'air libre et participant à la température t du milieu ambiant, l'autre entouré de glace fondante et par suite maintenu à 0° ; les deux colonnes mercurielles font équilibre à une même pression, nous sommes, par conséquent, dans le cas de deux liquides de densités différentes, placés dans des vases communiquants. On a donc (102) :

$$\frac{h_0}{h_t} = \frac{d_t}{d_0};$$

or, d'après la formule (c) (265), on a :

$$\frac{d_t}{d_0} = \frac{1}{1 + \Delta t}.$$

Δ était le coefficient de dilatation absolue du mercure $\frac{1}{5550}$; donc :

$$\frac{h_0}{h_t} = \frac{1}{1 + \Delta t} = \frac{5550}{5550 + t},$$

$$h_0 = \frac{h_t 5550}{5550 + t} = h_t - \frac{th_t}{5550 + t}.$$

Il faudra donc retrancher de la hauteur observée h_t le quotient de th_t par $5550 + t$.

Pour tenir compte de la dilatation de l'échelle métallique, il suffit de remarquer que, sur cette échelle, chaque division qui avait pour longueur 1 millimètre à 0°, représente à $t°$, une longueur $1 + Kt$, K étant le coefficient du métal dont elle est formée ; les divisions qui ont été lues sur l'échelle et qui représentent h_t millimètres à 0° auront, par suite, à $t°$, pour longueur réelle h_t 1(+ Kt) ; et il faudra écrire :

$$h_0 = \frac{h_t (1 + Kt)}{1 + \Delta t},$$

formule qui contient les deux corrections. Dans la plupart des cas, on ne fait pas celle qui concerne l'échelle; elle est négligeable à cause de sa petitesse. C'est pour ce motif, que nous avons étudié, en premier lieu, la correction plus importante qui se rapporte à la dilatation du mercure.

314. **Comparabilité des thermomètres à mercure en tenant compte de la dilatation de l'enveloppe.** — Nous avons vu (248) que, si l'on fait abstraction de l'enveloppe, tous les thermomètres à mercure sont rigoureusement comparables; ils le sont, quels que soient la dimension de leur réservoir et le diamètre de leur tige; plongés dans le même bain, ils doivent marquer tous le même nombre de degrés. Quelle est l'influence de l'enveloppe sur cette comparabilité?

Soit V_0 le volume à 0° du réservoir, jusqu'à la division de la tige qui correspond au niveau du mercure, quand l'appareil est plongé dans la glace fondante; V_0 sera aussi le volume à 0° du mercure contenu dans le thermomètre. Soit V' le volume apparent du réservoir et des divisions de la tige qui contiennent le mercure dilaté, quand le thermomètre passe de 0° à 100°; comme la capacité de l'instrument a été déterminée à 0°, $V'(1 + 100K)$ est la vraie valeur du volume intérieur du vase, qui contient le mercure à 100°. De même, le volume V_0 de ce liquide, en passant de 0° à 100°, est devenu $V_0(1 + 100\Delta)$, et comme le contenant doit être égal au contenu, on aura :

$$V'(1 + 100K) = V_0(1 + 100\Delta)$$

ou

$$V' - V_0 = \frac{(\Delta - K)100}{1 + 100K} V_0;$$

la capacité du degré sera la centième partie de $V' - V_0$, c'est-à-dire :

$$\frac{\Delta - K}{1 + 100K} V_0.$$

Avec un autre thermomètre fait avec le même verre et dont le réservoir aurait v_0 pour volume à 0°, la valeur du degré serait :

$$\frac{\Delta - K}{1 + 100K} v_0;$$

donc, tous les thermomètres à mercure, fabriqués avec une enveloppe vitreuse de même nature, donneront une valeur du degré centigrade, qui sera une fraction constante du volume de leur réservoir. La comparabilité sera complète. Il en est tout autrement, si K change, d'un thermomètre à l'autre. M. Regnault a mis le fait, en évidence, par des expériences directes. Le tableau suivant contient quelques-uns des nombres qu'il a obtenus, en notant, au même moment, les températures fournies par diffé-

rents thermomètres à mercure et en même temps, par un thermomètre à air plongé dans le même bain.

TEMPÉRATURE du thermomètre à air.	TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE A MERCURE. CRISTAL de Choisy-le-Roi.	VERRE ordinaire.	VERRE VERT.	VERRE DE SUÈDE.
100°..........	100°	100°	100°	100°
150............	150,4	149,8	150,3	150,15
200............	201,25	199,7	200,8	200,5
250............	253°	250,05	251,85	251,44

315. **Comparabilité du thermomètre différentiel de Leslie.** — Comme le tube qui fait communiquer ensemble les deux boules A et B (*fig.* 168) a toujours un très-petit diamètre, on peut admettre que la masse gazeuse possède un volume constant dans chacune d'elles ; alors, la formule *d* (266)

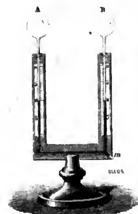


Fig. 168.

$$V_{t'} = V_t \frac{H}{H'} \cdot \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}$$

donne, en y faisant : $V_{t'} = V_t$

$$\frac{H'}{H} = \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

d'où

$$\frac{H' - H}{H} = \frac{\alpha(t' - t)}{1 + \alpha t}$$

ou

$$(H' - H) = \alpha \frac{H}{1 + \alpha t}(t' - t).$$

Dans le second membre, α est constant, puisque c'est le coefficient de dilatation de l'air ; $\frac{H}{1 + \alpha t}$ est aussi constant, car l'équation $\frac{H'}{H} = \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}$ donne $\frac{H}{1 + \alpha t} = \frac{H'}{1 + \alpha t'}$, donc la valeur du premier membre $H' - H$ varie proportionnellement à $t' - t$; la différence des pressions estimée par la différence des hauteurs de la colonne liquide dans les deux branches du thermomètre de Leslie, peut donc servir de mesure à la différence des températures des masses d'air contenues dans les deux boules.

DENSITÉS DES GAZ.

316. **Définition.** — On appelle *densité d'un gaz* : le rapport du poids d'un volume de ce gaz au poids d'un égal volume d'air, pris dans les mêmes conditions de température et de pression. Le mot *densité* n'a plus, il est

vrai, dans ce cas, le sens que nous lui avons attribué (28), mais nous nous sommes conformés, en adoptant la définition précédente, à un usage généralement suivi.

On remarquera que, tandis que nous comparons les poids spécifiques des corps solides et liquides à celui de l'eau prise à 4°, sous le même volume, ces corps eux-mêmes étant supposés à 0°; nous ne faisons point, pour les gaz, le choix d'une température fixe et d'une pression fixe. C'est que, nous admettons implicitement que la loi de Gay-Lussac et la loi de Mariotte peuvent s'appliquer, sans erreur notable, aux gaz examinés, et dès lors, le rapport en question demeure constant, quelle que soit la valeur absolue de la température et de la pression. Il serait cependant plus rigoureux de prendre, pour valeur de la densité d'une substance gazeuse, le rapport des poids de volumes égaux du gaz considéré et de l'air à une température fixe 0°, et à une pression fixe 760mm.

317. **Méthode générale.** — Voici d'abord la méthode générale qui a été employée par MM. Biot et Arago. Dans un ballon de verre B (*fig.* 169) muni d'un robinet et présentant une capacité de 8 à 10 litres environ, est introduit le gaz pur et sec dont on veut déterminer la densité. Soient t sa température et H sa pression. On pèse le ballon rempli de gaz ; soit P son poids. Le vide est fait ensuite dans le ballon, aussi complétement que possible, à l'aide d'une machine pneumatique ; appelons h la force élastique de la petite portion de gaz qui s'y trouve encore, au moment où l'on ferme le robinet. On pèse alors le ballon vide ; désignons son poids par p. Les mêmes opérations sont répétées, en introduisant dans le ballon de l'air sec et pur. Désignons par P_1, t_1, H_1, h_1, p_1 les données correspondantes obtenues, dans cette seconde phase de l'expérience.

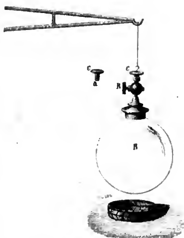


Fig. 169.

La petite portion de matière gazeuse qui reste dans le ballon, après qu'on a produit un vide imparfait, représente un poids constant qui fait, pour ainsi dire, partie de l'enveloppe de verre, et tout se passe dès lors, en vertu de la loi du mélange des gaz, comme si le gaz eût été, la première fois, sous la pression $H - h$, et qu'on eût fait ensuite le vide absolu. Alors $P - p$ sera le poids d'un volume de gaz égal au volume du ballon à t°, et sous la pression $H - h$. De même $P_1 - p_1$ sera le poids d'un volume d'air

égal au volume du ballon à t_1° et sous la pression $H_1 - h_1$. Cherchons ce que fussent devenus les poids de l'air et du gaz, si la température eût été pour chacun 0°, la pression 0m,76, et si en même temps, le ballon maintenu lui-même à 0°, eût présenté constamment le même volume. On a, en appliquant la formule (e) (267) pour le poids x du gaz, à 0° et à la pression 0,76 :

$$x = (P - p)\frac{0{,}76}{H - h}\cdot\frac{1 + \alpha t}{1 + Kt},$$

celui de l'air eût été pareillement :

$$y = (P_1 - p_1)\frac{0{,}76}{H_1 - h_1}\cdot\frac{1 + \alpha t_1}{1 + Kt_1}.$$

Les deux corps gazeux étant ramenés à la même température, à la même pression et au même volume, il faudra, d'après la définition donnée plus haut, diviser leurs poids l'un par l'autre, pour avoir la densité cherchée.

$$D = \frac{x}{y} = \frac{P - p}{P_1 - p_1}\cdot\frac{H_1 - h_1}{H - h}\cdot\frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_1}\cdot\frac{1 + Kt_1}{1 + Kt}.$$

318. **Corrections. — Perfectionnements apportés par MM. Dumas et Boussingault.** — Voilà théoriquement la marche à suivre pour obtenir D. Il s'agit maintenant de savoir, quelles seront les précautions à prendre pour évaluer, avec exactitude, les expressions numériques de chacun des quatre facteurs qui entrent dans la valeur de D. Étudions-les de près, un à un :

1° Le dernier $\frac{1 + Kt_1}{1 + Kt}$, contient le coefficient de dilatation cubique du verre du ballon. Comme on ne peut pas le déterminer sur le ballon lui-même, il y aura toujours incertitude sur sa vraie valeur.

2° Le précédent $\frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_1}$ suppose la connaissance exacte des températures de l'air et du gaz dans le ballon, au moment où l'on a fermé le robinet, avant les pesées. Si l'on se contentait de placer le ballon dans l'air et de consulter un thermomètre dans son voisinage, on ne pourrait pas espérer d'avoir une indication précise. La masse gazeuse renfermée dans le ballon n'aurait la température de l'air ambiant, qu'à la condition que cette température demeurerait pendant longtemps stationnaire. MM. Dumas et Boussingault avaient réalisé cette dernière condition, dans les mesures de densité qu'ils ont faites, en renfermant leur ballon dans une enceinte close, dont la paroi double contenait une épaisse couche d'eau. En outre, un thermomètre placé dans le ballon lui-même, ayant son réservoir au centre de la sphère, indiquait — par le niveau de sa colonne mer-

curielle devenue immobile, pendant un temps assez long — la vraie température du gaz confiné.

3° Le second facteur $\frac{H_1 - h_1}{H - h}$ n'exige que des mesures de hauteurs dans le baromètre ou dans un manomètre ; il peut être calculé avec précision.

4° Enfin examinons quelle est au juste la signification de chacune des données contenues dans le premier facteur $\frac{P - p}{P_1 - p_1}$. La lettre P représente le poids q de l'enveloppe, plus le poids x du gaz contenu dans le ballon, moins le poids p'_1 d'un volume d'air extérieur égal au volume du ballon. $P = q + x - p'_1$, de même $p = q - p'_1$. Si donc on admet que le poids q de l'enveloppe vitreuse et le poids p'_1 du volume d'air déplacé par le ballon n'aient pas changé ; on aura bien, comme nous l'avons admis jusqu'ici. $x = P - p$. Mais, la surface extérieure du ballon peut condenser, aux diverses époques de l'expérience, des quantités différentes de vapeur d'eau : le verre étant, comme on sait, très-hygrométrique ; d'autre part, la température, la pression, l'état hygrométrique de l'atmosphère extérieure changent à chaque instant, et il est impossible d'admettre que p'_1 soit constant. Nous n'avons donc pas le droit d'écrire $x = P - p$. L'erreur commise est loin d'être négligeable ; car le poids du volume d'air déplacé par le ballon est une grandeur de même ordre que celle que l'on veut évaluer.

C'est, pour se prémunir contre cette cause d'erreur, que MM. Dumas et Boussingault faisaient les pesées, en plaçant leur ballon dans une sorte d'armoire de bois doublée de plomb, placée au-dessous de la balance. L'air ne se renouvelant pas dans cette enceinte, pouvait être considéré comme possédant toujours la même constitution. De plus, ils avaient le soin, avant chaque pesée, d'essuyer le ballon, afin que le poids q de l'enveloppe vitreuse pût être considéré comme constant.

319. **Méthode de M. Regnault.** — M. Regnault a résolu le problème de la détermination des densités des gaz d'une manière très-élégante. Ce n'est pas en multipliant les corrections qu'on perfectionne une méthode en physique, car chacune d'elles apporte une petite erreur, et ne fait qu'accroître l'incertitude du résultat final ; c'est en se plaçant dans des conditions telles, que la plupart de ces corrections deviennent inutiles, qu'on peut atteindre une grande précision. A ce point de vue, le procédé suivi par M. Regnault, pour mesurer la densité des gaz, est un véritable modèle à suivre. Le ballon B préalablement desséché (*fig.* 170) est plongé dans la glace fondante, pendant qu'on le remplit de la substance gazeuse. De cette manière, il possède, dans tous les cas, un volume invariable ; le facteur $\frac{1 + Kt_1}{1 + Kt}$ devient égal à 1 et on n'a pas besoin de connaître K.

En second lieu, le ballon communique, par un tube à trois branches T,

d'une part, avec la machine pneumatique; de l'autre, avec un baromètre différentiel, formé de deux baromètres M et M', qui plongent dans la même cuvette C; l'un d'eux M communique, par le haut, avec l'enceinte contenant le gaz. Au moment où l'on ferme le robinet R, on mesure avec le cathétomètre, la différence des niveaux du mercure dans les deux baromètres. Le facteur $\frac{H_1 - h_1}{H - h}$, est alors exactement connu. En même temps, la température qui se rapporte au gaz dont on veut avoir le poids, étant toujours égale à 0°, à cause de l'immersion prolongée du ballon dans la glace fondante, le facteur $\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_1}$ est réduit à l'unité.

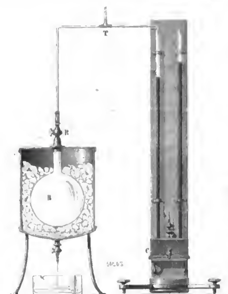


Fig. 170.

Enfin, dans le but de s'affranchir des incertitudes dues à l'état variable de l'atmosphère environnante, M. Regnault, pour exécuter ses pesées, fait équilibre à son ballon, avec un ballon tout à fait semblable formé du même verre, ayant exactement le même volume et hermétiquement fermé. — Les influences diverses dues à l'air ambiant affectent alors de la même quantité les deux ballons, et l'on peut affirmer qu'elles se trouvent ainsi annulées dans leur action perturbatrice. Cette assertion est parfaitement justifiée par l'expérience : M. Regnault, après avoir disposé ses deux ballons, chacun à l'une des extrémités du fléau d'une balance, a établi l'équilibre dans l'air, à une certaine époque. Il a constaté que le même équilibre subsistait encore une heure, deux heures, vingt-quatre heures après, lorsque, sans toucher aux ballons, on rendait libre le fléau de la balance, par l'abaissement des fourchettes. Et cependant, il y avait eu, dans cet intervalle de temps, de nombreuses variations dans la composition de l'air extérieur.

Le second ballon était choisi un peu plus pesant que le ballon plein de gaz qui servait à l'expérience; et, dans une première pesée, il fallait, pour établir l'équilibre, ajouter des poids π du côté où était suspendu le ballon à densité. Dans une seconde pesée, quand ce ballon ne contenait

plus que le gaz raréfié, il fallait ajouter un poids plus grand π'. Donc $\pi' - \pi$ représente le poids du gaz qu'a enlevé la machine pneumatique.

La formule générale se trouve alors réduite à la forme simple :

$$D = \frac{\pi' - \pi}{\pi_1' - \pi_1} \frac{H_1 - h_1}{H - h}.$$

Voici les densités des principaux gaz :

	D'après M. Regnault.	D'apres MM. Dumas et Boussingault.
Azote	0,97137	0,972
Hydrogène	0,06926	0,0693
Oxygène	1,10563	1,1057
Acide carbonique	1,52901	»

320. **Poids du litre d'air dans les conditions normales. — Mesure de la capacité des vases.** — La méthode précédente fournissait à M. Regnault le poids exact de l'air sec, qui remplissait le ballon à 0°, sous la pression $H_1 - h_1$, et par conséquent à la pression de 0m,76; il n'y avait plus qu'à jauger le ballon et à diviser le poids total de l'air par le volume du ballon à 0°, exprimé en litres, pour avoir le poids d'un litre d'air dans les conditions normales.

A cet effet, on pesa dans l'air, le ballon ouvert qui avait déjà servi à la détermination des densités : son poids fut trouvé égal à 1258gr,55 ; la température ambiante était de 4°,2, et la hauteur barométrique de 757mm,89. On le remplit ensuite d'eau récemment bouillie et on le plongea, pendant treize heures, dans la glace fondante, en le maintenant plein d'eau privée d'air.

Le robinet du ballon fut alors fermé ; le ballon retiré de la glace et laissé, pendant deux heures, dans une chambre où la température était égale à 6°, se trouvait stationnaire. On n'avait pas à craindre la rupture du ballon, par suite du réchauffement de l'eau qui le remplissait, car ce liquide occupe à 6° un volume moindre qu'à 0.

Le poids du ballon plein d'eau fut trouvé égal à 11126gr,05; la hauteur barométrique à ce moment était de 761mm,77.

Mais l'enveloppe du ballon à 4°,2 et à 757mm,85 de pression extérieure, possède, à moins de 1 milligr. près, le même poids qu'à 6° et à 761mm,77 ; si donc, on retranche la première pesée de la seconde, on aura pour poids apparent de l'eau qui remplit le ballon à la température de 0° : 9867gr,50. Pour avoir le poids absolu de cette eau, il faut lui ajouter le poids du volume d'air extérieur déplacé par le ballon. Or le poids de l'air à 0° et à 0m,76 qui remplissait le ballon avait été trouvé égal à 12gr,778; pour en avoir le poids à 6° et à la pression 761mm,77, on devra appliquer la formule (*e*) (267) qui donne :

$$x = 12{,}778 \, \frac{761{,}77}{760} \, \frac{1}{1 + 0{,}00366 \times 6} = 12^{gr},532.$$

Ce poids n'est pas encore exact ; il faut, par une méthode que nous indiquerons plus loin, tenir compte de la vapeur d'eau contenue dans l'air au moment de la pesée : ce qui réduit à 12gr,473 le poids trouvé. Qu'on l'ajoute au poids apparent de l'eau indiqué plus haut, on aura pour son poids absolu 9879gr,973.

Il reste à savoir quel eût été le poids d'eau correspondant au même volume, si cette eau avait eu 4° de température ? Pour le calculer, remarquons que le volume est constant, et que par suite les poids sont proportionnels aux densités :

$$\frac{y}{9879^{gr},973} = \frac{d_4}{d_0};$$

mais, dans les tables qui donnent les densités de l'eau à diverses températures $\frac{d_4}{d_0} = \frac{1}{0,999881}$; on a alors :

$$y = \frac{9879,973}{0,999881} = 9881^{gr},060.$$

Donc le volume du ballon est de 9litres,881.

Par suite, le poids du litre d'air sec à 0° et sous la pression 0m,76, sera :

$$\frac{12^{gr},778}{9,881} = 1^{gr},293187.$$

Ces détails, on le voit, sont longs et minutieux ; mais, nous avons tenu à les donner, pour bien montrer quelle est la marche à suivre et quelles sont les précautions à prendre, quand il s'agit de mesurer la capacité d'un vase.

321. **Poids spécifique de l'air à 0° et sous la pression normale.** — On déduit, du résultat précédent, le poids spécifique de l'air. Un litre d'eau à 4° pesant 1000 grammes, on aura pour le poids spécifique ε de l'air à 0° et à la pression 0m,76, la fraction $\varepsilon = 0,001293$.

322. **Densités des gaz qui attaquent le mercure.** — Un autre cas, où la mesure de la capacité d'un vase devient nécessaire, c'est celui de la détermination de la densité des gaz qui attaquent le mercure et le métal des robinets. On emploie alors, au lieu d'un ballon, un grand flacon bouché à l'émeri qu'on pèse : 1° plein d'air dans les conditions où l'air se trouve dans l'atmosphère : soit P_a le poids trouvé ; 2° plein du gaz, de chlore, par exemple, sec et pur : soit P_c le poids nouveau ; enfin 3° plein d'eau distillée : soit P_e le poids correspondant.

Nous indiquerons rapidement la méthode, sans entrer dans le détail minutieux des soins à prendre, pour éviter les causes d'erreur.

Soit π le poids absolu du flacon et p'_1 le poids du volume d'air ambiant

déplacé par le flacon, poids que nous supposons le même dans les trois pesées, on aura :

$$P_a = \pi + p_1 - p'_1$$
$$P_c = \pi + x - p'_1$$
$$P_e = \pi + y - p'_1$$

p_1, x et y étant les poids d'air de chlore et d'eau contenus dans le flacon. On tire de ces égalités :

$$x = P_c - P_a + p_1$$
$$y = P_e - P_a + p_1$$

y étant le poids d'eau qui remplit le flacon à t^o, son volume sera $\frac{y}{d_t}$, si d_t désigne le poids spécifique de l'eau à t^o; donc $\frac{P_e - P_a + p_1}{d_t}$ est le volume du flacon; et si l'on appelle ε' le poids spécifique de l'air, dans les conditions actuelles de l'expérience, on aura :

$$\left(\frac{P_e - P_a + p_1}{d_t}\right)\varepsilon' = p_1 \quad \text{d'où} \quad p_1 = \varepsilon' \frac{P_e - P_a}{d_t - \varepsilon'},$$

La valeur de p_1 substituée dans l'expression de x, donne le poids d'un volume de chlore égal au volume du flacon, à une température connue et à une pression connue.

$$x = P_c - P_a + \varepsilon' \left(\frac{P_e - P_a}{d_t - \varepsilon'}\right) = \frac{d_t (P_c - P_a) + \varepsilon' (P_e - P_c)}{d_t - \varepsilon'}.$$

Le poids d'un volume d'air sec à la même température et à la même pression que le chlore, et remplissant comme lui le volume du flacon, se calculerait, de la même manière, puisque le volume du flacon est actuellement connu. Le quotient du poids du chlore par le poids de l'air, dans les mêmes circonstances de volume, de température et de pression, donnera finalement la densité cherchée.

CORRECTIONS DES DENSITÉS, DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

323. **Méthode de la balance hydrostatique.** — Quand on détermine les poids spécifiques des solides et des liquides, par les méthodes que nous avons décrites, le corps sur lequel on opère, n'a pas habituellement la température de 0°, l'eau n'est pas à 4°. Il est donc nécessaire d'effectuer des corrections qui ramènent les nombres obtenus à ce qu'ils eussent été, si l'on s'était placé dans les conditions normales indiquées par la définition même du poids spécifique d'un corps. Nous nous occuperons des corrections relatives à une seule méthode : celle de la balance hydrostatique.

Pour le cas des corps solides, nous avons vu (115) qu'il faut exécuter

trois pesées : 1° faire équilibre au corps dans l'air avec une tare ; 2° le plonger dans l'eau et ajouter des poids gradués p pour rétablir l'équilibre ; 3° enlever le corps et rétablir l'équilibre par des poids gradués P.

Traduisons ces opérations en langage algébrique. Dans ces trois cas, la tare est la même ; le poids apparent du corps dans l'air est :

$$y - \frac{y}{D_0}(1 + Kt)\,\varepsilon' \quad \text{ou} \quad y\left(1 - \frac{1 + Kt}{D_0}\varepsilon'\right);$$

y représente le poids absolu du corps dans le vide, K son coefficient de dilatation, D_0 sa densité cherchée à 0° et ε' le poids spécifique de l'air dans les conditions atmosphériques actuelles ; ε' peut d'ailleurs se calculer, comme il sera dit plus loin.

Dans la seconde pesée, la pression exercée sur le même bassin de la balance est égale aux poids gradués p, plus le poids absolu du corps y, moins le poids d'un volume d'eau égal au volume du corps (l'eau et le corps étant à $t°$), poids qui a pour expression $\frac{y(1 + Kt)}{D_0(1 + u)}$, si u désigne la dilatation totale de l'eau de 4° à $t°$. Cette pression est la même que celle que produisait auparavant le poids apparent du corps dans l'air, dont nous venons d'écrire la valeur.

On aura donc :

$$p + y - \frac{y}{D_0}\left(\frac{1 + Kt}{1 + u}\right) = y\left[1 - \frac{1 + Kt}{D_0}\varepsilon'\right];$$

d'où

$$y = \frac{pD_0(1 + u)}{(1 + Kt)\{1 - \varepsilon'(1 + u)\}}.$$

Enfin, dans la troisième pesée, les poids gradués P font équilibre à la tare dans l'air, c'est-à-dire qu'on a :

$$P = y\left[1 - \frac{1 + Kt}{D_0}\varepsilon'\right],$$

ou

$$y = \frac{PD_0}{D_0 - (1 + Kt)\varepsilon'}.$$

Il ne reste plus qu'à égaler les deux valeurs de y et à déduire, de l'équation obtenue, la valeur cherchée :

$$D_0 = \frac{P}{p}\left(\frac{1 + Kt}{1 + u}\right) - \frac{\varepsilon'(P - p)(1 + Kt)}{p}.$$

Nous avons ainsi tenu compte de la poussée de l'air sur le corps et, en outre, ramené le corps à 0° et l'eau à 4°. Il faudra suivre une marche

analogue pour effectuer les corrections qui se rapportent, à la méthode du flacon et à celle de l'aréomètre.

324. Influence exercée par la poussée de l'air sur les poids gradués. — On remarquera, que nous avons passé, sous silence, la poussée exercée par l'air sur les poids gradués ; cependant, dans les cas ordinaires, les poids sont construits pour être exacts dans le vide et la pression exercée par eux, sur le bassin de la balance placée dans l'air, n'est ni P ni p, c'est $P\left(1-\frac{v'}{d}\right)$ et $p_{,}\left(1-\frac{v'}{d}\right)$; d étant la densité du métal qui forme les poids ; mais, comme pour l'estimation des densités, on prend toujours des rapports ; que par suite, P ou p entrent dans chaque terme, le facteur $\left(1-\frac{v'}{d}\right)$ disparait nécessairement. Il est donc inutile de s'occuper de cette correction, quand, dans toutes les pesées, on se sert de poids fabriqués avec le même métal. Au contraire, dans les cas où l'on veut obtenir le poids vrai d'un corps ou la capacité d'un vase, il faut tenir compte de la poussée subie par les poids échantillonnés, comme nous l'avons expliqué (183).

PYROMÈTRES A GAZ.

325. Nous avons déjà dit (241) quels sont les avantages des gaz considérés comme substances propres à la construction des thermomètres. On a cru longtemps, en se fondant sur la loi de Gay-Lussac, que le thermomètre à gaz représentait le véritable thermomètre normal ; ce qu'il y a de certain, c'est que l'enveloppe ayant ici une influence négligeable, ces instruments sont rigoureusement comparables à eux-mêmes, et, en outre, comme l'ont appris les expériences de M. Regnault, ils sont comparables entre eux, à la condition que, dans la formule servant à calculer la température, on introduise le coefficient de dilatation propre au gaz employé.

Deux méthodes générales peuvent être suivies pour la construction des thermomètres à gaz : ou bien laisser la pression du gaz constante et évaluer sa variation de volume. Pour mesurer les hautes températures, M. Pouillet a construit sur ce principe, un pyromètre à air, dont le réservoir en platine est placé dans le foyer de chaleur, en même temps que la portion du gaz provenant de la dilatation vient se loger dans un mesureur possédant une température connue. — On peut reprocher à cet instrument de manquer de sensibilité dans la mesure des températures très-élevées. — Ou bien, le volume du gaz est maintenu constant et on mesure la variation de sa force élastique. Alors la marche de l'expérience est analogue à celle que nous avons indiquée, pour la détermination du coefficient de dilatation des gaz par le procédé de M. Regnault (303 et 304). Ici, α est connu à l'avance, et l'on prend T pour inconnue, dans la formule établie,

Malheureusement, un pareil pyromètre ne peut servir que jusqu'à la température du ramollissement du verre.

326. **Méthode de MM. H. Deville et Troost.** — Pour opérer à des points plus élevés de l'échelle thermométrique, on a recours à une méthode dont le principe est dû à M. Dumas et qui a été ingénieusement appliquée par MM. Deville et Troost à la détermination de la densité de vapeur du soufre, du sélénium, du phosphore, etc. Le grand avantage de cette méthode, c'est de remplacer la substance pyrométrique ordinaire, l'air, dont la densité est très-faible, par une vapeur beaucoup plus pesante, qui donne par suite, à l'appareil de mesure, une plus grande sensibilité.

Dans un ballon de porcelaine de 280 à 300 centimètres cubes, dont le volume sera jaugé ultérieurement et dont le coefficient de dilatation est connu, on introduit de l'iode en grand excès. Ce ballon est placé dans l'enceinte dont on veut déterminer la température, l'extrémité du col demeure en dehors et se trouve fermée, à peu près exactement, par un petit cône de porcelaine qui, n'étant que posé sur l'ouverture, pendant la durée de l'expérience, n'empêche pas la vapeur de s'échapper. L'iode fond, entre en ébullition ; sa vapeur expulse l'air contenu dans le ballon et quand il n'y a plus de jet de vapeur à l'ouverture extérieure, c'est que tout l'iode s'est volatilisé et que la vapeur remplit exactemen le ballon, à la température x de l'expérience, sous la pression H de l'atmosphère donnée par le baromètre. Alors, on ferme l'ouverture du ballon avec le dard du chalumeau à gaz ; on laisse refroidir et l'on pèse le ballon avec l'iode qui y est contenu : soient P ce poids, V_0, le volume du ballon à 0°, K le coefficient de dilatation cubique de la porcelaine, d la densité de la vapeur d'iode qui, dans les températures élevées, se comporte comme un gaz ; soit enfin P' le poids du même ballon plein d'air dans les conditions actuelles de l'atmosphère. P — P' est la différence entre le poids y de la vapeur d'iode contenue dans le ballon et le poids p'_1 d'un égal volume de l'air ambiant ; on aura donc $y = P - P' + p'_1$. On sait d'autre part (267) que p'_1 a pour expression :

$$\frac{V_0(1+Kt)\,1,293\,H}{(1+\alpha t)\,0,76},$$

en admettant que l'air soit sec ; H et t étant la pression et la température de l'atmosphère au moment de l'expérience. A x degrés, le volume du ballon est $V_0(1+Kx)$, c'est aussi le volume de la vapeur d'iode ; or, d'après la formule (e) (267), le poids d'un volume $V_0(1+Kx)$ de vapeur d'iode à x° et à la pression H a pour expression

$$\frac{V_0(1+Kx)\times 1^{gr},293\times H\times d}{(1+\alpha x)\,0,76};$$

on aura donc l'égalité :

$$P - P' + \frac{V_0(1 + Kt)\ 1,298 \times H}{(1 + \alpha t)\ 0,76} = \frac{V_0(1 + Kx)\ 1^{gr},293 \times H \times d}{(1 + \alpha x)\ 0,76},$$

d'où l'on déduira x.

CHAPITRE III

CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS.

327. En graduant l'action de la chaleur sur un corps, on le fait passer à volonté, par l'un ou l'autre des trois états, sous lesquels la matière se présente à nous. Chauffe-t-on un corps solide ? il devient liquide. On a ainsi opéré un premier changement d'état, la fusion. Chauffe-t-on le liquide ? il devient gazeux ; c'est le second changement d'état, la volatilisation ou vaporisation. Refroidit-on suffisamment le corps gazeux ? il redevient liquide ; on a produit un changement inverse du précédent, la liquéfaction. Enfin soumet-on le liquide à un refroidissement assez intense ? il se congèle, on a ramené le corps à l'état solide, on a déterminé sa solidification.

Nous allons étudier successivement ces quatre passages des corps à des états différents, en insistant moins sur les faits isolés que sur les lois générales.

SECTION I

Fusion.

328. **Première loi de la fusion. — Température fixe de la fusion.** — Chaque corps, chaque espèce chimique fond à une température déterminée, invariable, qu'on nomme son *point de fusion* (nous indiquerons tout à l'heure une certaine restriction à introduire dans l'énoncé de cette loi). Ce point de fusion devient même, dans quelques cas, un caractère qui permet de reconnaître la pureté d'une substance.

Les divers corps présentent, au point de vue de leur température de fusion, des différences très-marquées. On peut dire que, si on les rangeait en série continue, suivant leur plus grande facilité à se convertir en liquide, on

parcourrait, en suivant leurs points de fusion, tous les degrés de l'échelle thermométrique, ainsi :

L'acide sulfureux fond .... à	— 100°
L'acide carbonique..................	— 78
Le mercure..........................	— 40
L'acide hypoazotique................	— 9
L'eau...............................	0
Le chlorure de calcium hydrate......	+ 29
Le phosphore........................	44,2
La cire.............................	64
L'acide stearique...................	70
Le soufre...........................	115
L'étain.............................	228
Le plomb............................	332
L'antimoine.........................	434
L'argent............................	1000
L'or................................	1250
Le fer..............................	1500

Enfin, le platine fond à une température qu'on peut évaluer à 2000°, d'après les déterminations récentes de MM. Deville et Debray. Il n'est pas jusqu'au charbon, qu'on avait considéré longtemps comme absolument infusible, qui ne semble se ramollir, à de très-hautes températures.

Il est bon de remarquer que certains corps solides, lorsqu'on les chauffe, se décomposent au lieu de fondre : tels sont le carbonate de chaux, la cellulose, etc. Toutefois, le carbonate de chaux subit la fusion ordinaire, lorsqu'il est chauffé dans un vase hermétiquement clos et à parois résistantes. Les premières portions d'acide carbonique, qui proviennent du dédoublement de la substance, exercent une pression croissante, qui permet la fusion en rendant impossible toute décomposition nouvelle.

329. **Production des températures élevées pour déterminer la fusion des corps.** — Voici un aperçu rapide des méthodes récemment imaginées pour produire les températures les plus hautes auxquelles on soit parvenu : la chaleur est fournie dans tous les cas, soit par la combustion du charbon, soit par celle de l'hydrogène, soit enfin par le passage de courants voltaïques d'une grande puissance.

330. **1° Par la combustion du charbon.** — La combustion du charbon est le moyen vulgaire; mais on était loin d'en tirer tout le parti possible. C'est M. H. Saint-Claire Deville, qui a le premier analysé, d'une manière très-nette, les conditions nécessaires pour produire les températures extrêmes, en recourant simplement à la combinaison du charbon avec l'oxygène.

Sans doute, quoi qu'on fasse, un poids déterminé de charbon ne fournira jamais, en brûlant, qu'une quantité invariable de chaleur, qu'il n'est possible

d'accroître par aucun moyen; mais ce à quoi l'on peut arriver, c'est d'accumuler toute la chaleur produite, dans un espace très-restreint et de la développer, dans le temps le plus court possible. La température des corps placés dans le foyer incandescent s'élèvera d'autant plus que ces deux conditions seront plus complétement réalisées.

Dans les fourneaux des laboratoires, on place d'habitude, une longue colonne de combustible qui, à un moment donné, brûle tout entière. Il y a sans doute beaucoup de chaleur développée; mais la majeure partie se trouve disséminée en pure perte, et le creuset, placé au centre du fourneau, n'en absorbe, à son profit, qu'une minime proportion. Au lieu de cela, restreignez la combustion sur une hauteur très-petite; employez du charbon réduit en petits fragments, de manière à présenter à l'oxygène une large surface; activez la circulation de l'air, au contact du combustible, et vous vous trouverez évidemment dans les conditions les plus favorables.

331. **Méthode de M. Deville.** — M. Deville emploie de préférence ces fragments de charbon, ces escarbilles qui tombent de la grille des calorifères chauffés à la houille; il fait d'abord un premier triage pour éliminer le mâche-fer, et passe ensuite tous ces débris au crible, pour éliminer les cendres; puis, en écrasant les plus gros fragments, il obtient un combustible dont les morceaux varient de la grosseur d'un petit pois à celle d'une noisette. L'appareil dans lequel ce combustible est brûlé, se compose d'un cylindre de terre réfractaire (*fig.* 171), de 18 centimètres de diamètre, posé sur le rebord plan d'une cavité hémisphérique, dont il est séparé par une grille circulaire G, percée de trous d'un petit diamètre (8 à 10 millimètres). Le vent d'un fort soufflet de forge est amené dans la cavité A et se distribue, à la faveur de la grille, sur toute la section du fourneau. Le creuset M contenant la matière à fondre est posé au centre du fourneau, et se trouve entouré de ce combustible à petits fragments qui garnit entièrement la partie annulaire comprise entre le creuset et le cylindre. Dans ces conditions, l'échauffement maximum commence à 2 ou 3 centimètres au-dessus de la grille circulaire et se maintient dans une hauteur de 6 à 8 centimètres, précisément dans la région occupée par le creuset. Au-dessus, un refroi-

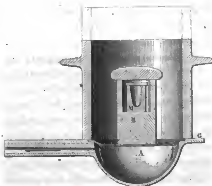


Fig. 171.

dissement intense se produit, par suite de la conversion de l'acide carbonique en oxyde de carbone.

Les creusets destinés à subir ces hautes températures doivent être fabriqués avec les substances les plus réfractaires. La chaux vive, le charbon des cornues à gaz, l'alumine ou bien un mélange d'alumine et de marbre pulvérisé sont celles qui conviennent le mieux.

332. **Résultats.** — Avec ces dispositions, M. Deville est parvenu à fondre directement le platine, et à transformer des quantités considérables de ce métal en un culot qui, refroidi, présentait une malléabilité parfaite. Dans quelques essais, le platine a même pu être volatilisé. La silice a été fondue par masses de 30 grammes, dans les creusets de graphite.

333. 2° **Par la combustion de l'hydrogène.** — Par la combustion de l'hydrogène convenablement dirigée, les effets acquièrent une intensité plus grande encore. On connaissait depuis longtemps l'action calorifique très-énergique due à la combustion d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène, fait en proportions convenables. Le chalumeau à gaz de Newman, celui de M. Desbassyns de Richemond, construits dans le but d'utiliser cette chaleur, ont rendu à la science d'importants services. M. Gaudin était parvenu, par l'emploi d'appareils de ce genre, à la fusion des substances minérales les plus réfractaires et à la production artificielle de quelques pierres précieuses, avec la forme cristalline qu'elles ont dans la nature. Mais, on n'avait pas tiré tout le parti possible de l'énorme masse de chaleur dégagée par l'oxydation de l'hydrogène. MM. Deville et Debray ont imaginé, en exécutant leur grand travail sur le platine et les métaux de la famille du platine, d'ingénieuses dispositions auxquelles on doit des résultats inespérés.

334. **Description de l'appareil de MM. H. Deville et Debray.** — Dans l'appareil de ces expérimentateurs, l'oxygène et l'hydrogène arrivent par deux conduits distincts munis de robinets R et R' (*fig.* 172). Le premier gaz circule dans un tube cylindrique central C en cuivre, de 3 millimètres de diamètre terminé par un bout de platine *m*. L'hydrogène arrive par la partie annulaire K comprise entre le tube à oxygène et un cylindre extérieur D, de 12 millimètres de diamètre, dont la partie supérieure est en cuivre et la partie inférieure en platine. Ce cylindre extérieur descend un peu plus bas que *m*, de sorte que le mélange des deux gaz s'opère, à une petite distance, à 3 ou 4 millimètres, du point où la combustion doit avoir lieu.

Le four destiné à la fusion des substances réfractaires est entièrement formé par des fragments de chaux vive; il se compose d'un cylindre H, percé d'une ouverture centrale et destiné à contenir les creusets; d'un autre cylindre G de même dimension, portant un canal intérieur assez étroit, disposé pour recevoir le chalumeau, et enfin d'un disque S servant

de support aux deux cylindres. Des conduits X, Y, pratiqués à la base du cylindre de chaux H, permettent aux produits de la combustion de s'échapper à l'extérieur. On remarquera que le creuset I est surmonté d'un cône de chaux vive, dont le but est d'obliger la flamme du gaz oxy-hydrogène à se distribuer également tout autour du creuset. Comme la chaux se fendille toujours un peu pendant le chauffage, les fragments sont maintenus en place, à l'aide de cercles de fer doux.

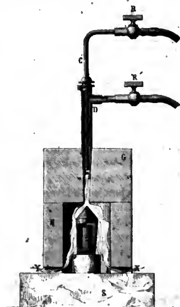


Fig. 172.

L'appareil ainsi disposé est d'un emploi très-commode. Les deux gaz provenant de gazomètres placés dans le voisinage arrivent à l'orifice *m*, où le mélange est enflammé. On règle facilement leur vitesse de sortie, en s'aidant du bruit particulier que le dard fait entendre. Y a-t-il excès d'hydrogène? la flamme souffle ; avec un excès d'oxygène, elle siffle. On ouvre alors plus ou moins les robinets, de manière à rendre le bruit aussi faible que possible. Au bout de quelques minutes, la température maxima est atteinte.

335. **Résultats obtenus.** — Le ruthénium, le métal le plus réfractaire de la famille du platine, est fondu dans cet appareil, à la condition d'être placé à 1 ou 2 millimètres de l'extrémité *m* du chalumeau ; mais il faut se servir du dard le plus chaud qu'il soit possible de produire. Dans les mêmes circonstances, l'osmium ne paraît pas fondre, mais il se volatilise. Quant au palladium, et surtout au platine, le moins infusible des métaux du groupe, leur fusion est devenue, entre les mains de MM. Deville et Debray, une opération des plus simples. Avec leur four un peu modifié, MM. Deville et Debray sont parvenus à fondre 11^{kil},595 de platine en une seule opération ; 42 minutes ont suffi pour opérer la fusion et l'affinage. Le métal se maintient assez longtemps liquide, dans la coupe en chaux vive ; et il devient très-facile de le couler dans une lingotière, comme on le fait pour l'acier. MM. Deville et Debray estiment, d'après leurs essais, qu'il suffit de 60 litres d'oxygène pour fondre un kilogramme de platine.

336. Les phénomènes, depuis longtemps observés, les résultats nouveaux qui viennent d'être présentés, montrent que les substances qui

résistent à la fusion sont de moins en moins nombreuses, à mesure qu'on perfectionne les moyens de produire des températures très-élevées. Aussi, quoique la science ne puisse pas aujourd'hui, amener tous les corps à l'état liquide, on n'en a pas moins le droit de conclure qu'il n'est pas de corps absolument réfractaire; il n'en est aucun qui, porté à une température suffisamment haute, ne soit susceptible de fondre.

337. **Deuxième loi de la fusion. Chaleur latente de fusion.** — La température d'un corps, qui fond, demeure invariable, quelle que soit la température du foyer de chaleur au milieu duquel il se trouve placé. Si la quantité de chaleur reçue par le corps devient plus grande en un temps donné, sa fusion est plus prompte, mais sa température ne change pas. C'est précisément cette propriété qui nous a permis de choisir, maintes fois, la glace fondante, pour produire une température constante, pendant un temps quelconque.

Que devient donc la chaleur fournie par le foyer? Elle est employée à effectuer le travail moléculaire, dont le résultat est la désagrégation du corps solide, sa fusion. On donne à cette chaleur, le nom de chaleur latente, pour la distinguer de la chaleur sensible, celle qui détermine la température d'un corps et qui agit sur un thermomètre pénétrant dans sa masse. On apprendra plus tard, dans le chapitre de la calorimétrie, à mesurer cette chaleur latente; disons, dès à présent, que l'unité de poids de chaque substance exige pour fondre une quantité invariable de chaleur et que le nombre qui la représente est une nouvelle constante spécifique propre à caractériser la substance. Ce nombre varie d'ailleurs beaucoup d'un corps à un autre.

338. **Dissolution.** — Un solide peut passer à l'état liquide dans des conditions tout autres que celles que nous avons signalées. Le sel ordinaire et le sucre se dissolvent dans l'eau, l'iode dans l'alcool, le soufre et le phosphore dans le sulfure de carbone; or, ce phénomène de dissolution est tout à fait comparable à une fusion ordinaire, puisque la séparation des molécules est produite dans le solide, sous l'influence du dissolvant, d'une manière aussi complète qu'elle l'eût été par l'intervention de la chaleur.

La dissolution ne se fait plus, il est vrai, à une température fixe, comme la fusion; mais elle consomme, elle aussi, une certaine quantité de chaleur qui devient latente.

339. **Applications. — Mélanges réfrigérants.** — Cette absorption de chaleur, au moment de la fusion ou de la dissolution d'un corps solide, a été utilisée pour produire des froids très-intenses, à l'aide de certains mélanges qu'on appelle, pour ce motif : *mélanges réfrigérants*. Qu'on mette en contact deux corps qui peuvent se combiner ensemble ou se dissoudre l'un l'autre; s'ils sont tous les deux solides, ni la combinaison ni la dissolu-

tion ne seront possibles; ils devront devenir liquides tout d'abord; et, si aucune source étrangère ne leur fournit le calorique de fluidité, ils feront passer leur chaleur sensible à l'état de chaleur latente, se refroidiront eux-mêmes en fondant et refroidiront aussi les corps voisins. L'abaissement de température déterminée, dans ce cas, sera limité par la congélation du liquide, qui aura été le produit de la dissolution ou de la combinaison des deux corps.

Toutefois, il y a ici une influence qui contre-balance, en partie, l'effet frigorifique dont nous parlons. Comme, il n'y a pas de combinaison chimique sans dégagement de chaleur, l'effet obtenu n'est que la résultante de ces deux actions contraires : absorption de chaleur par le fait de la fusion, dégagement de chaleur par le fait de la combinaison. Les substances qu'on mélangera devront donc être choisies de telle façon que cette résultante soit toujours, dans le sens d'un abaissement de température.

340. Les corps le plus fréquemment employés pour former des mélanges réfrigérants sont : la glace pilée et le sel marin qui, mélangés intimement dans la proportion de deux parties de glace pour une de sel marin, produisent un abaissement de température, de $+15°$ à $-20°$.

Avec le chlorure de calcium hydraté et la neige, on peut atteindre une température beaucoup plus basse, celle de la solidification du mercure. Les meilleures proportions à employer sont de 4 parties de sel pour 3 de neige; la quantité de sel peut être augmentée impunément, mais non celle de la neige. Dans ces conditions, la température peut descendre à $-48°,5$ comptés sur le thermomètre à alcool absolu et à $-51°$ comptés sur le thermomètre à air. Seulement, le chlorure de calcium doit se trouver à un état d'hydratation convenable et sous la forme de poussière, afin que le mélange avec la neige puisse être bien intime : M. Person a indiqué un procédé commode pour le préparer. On fait une dissolution concentrée de chlorure de calcium, et on la chauffe jusqu'à ce que la température d'ébullition soit de 129° : à ce moment, on laisse refroidir, et, avec une spatule de bois, on agite la dissolution, d'une manière continue; pendant la solidification, le sel se réduit en petits cristaux pulvérulents comme du sable qu'on doit conserver dans des flacons bouchés à l'émeri.

341. On peut aussi obtenir des mélanges réfrigérants par l'emploi d'un solide et d'un liquide, l'acide chlorhydrique et le sulfate de soude par exemple ; ce sont précisément ces deux corps qui servent à produire la congélation de l'eau dans ces appareils, aujourd'hui assez répandus, qu'on nomme glacières artificielles. Avec 8 parties de sulfate de soude et 5 d'acide chlorhydrique, la température peut s'abaisser à $-16°$. Comme l'emploi journalier des acides peut devenir dangereux, il vaut mieux recourir à un mélange formé de parties égales d'azotate d'ammoniaque et d'eau ; ce dernier sel, quoique coûteux, n'exige qu'une première mise de fonds ; car,

en évaporant la dissolution, on régénère indéfiniment l'azotate d'ammoniaque cristallisé. Toutefois, l'action frigorifique produite par ce dernier mélange n'amène la congélation de l'eau, que lorsque la température de l'air ambiant n'est pas trop élevée. Enfin, on peut aussi se servir, dans le même but, d'un mélange de neige et d'acide sulfurique; mais ici surtout, on doit tenir compte des proportions employées des deux substances. Tandis que trois parties de neige et une d'acide sulfurique produisent un refroidissement, trois d'acide sulfurique et une de neige déterminent une forte élévation de température.

342. **Changements de volume au moment de la fusion.** — Un corps, en fondant, augmente de volume. — On ne connait qu'un petit nombre d'exceptions à cette loi générale, exceptions offertes par la glace, la fonte, le bismuth, l'argent. — Le changement de volume se fait, en général, d'une manière brusque, au moment de la fusion.

343. **Méthode. — Expériences de M. Kopp.** — M. Billet a évalué, l'un des premiers, la dilatation qui se produit au moment de la fusion; ses expériences ont eu pour objet le phosphore, le soufre et l'iode. M. Kopp, en employant la même méthode, a étendu ses recherches à un plus grand nombre de substances. S'agit-il de l'acide stéarique ou de la stéarine, corps gras neutre qui existe dans les graisses en général? M. Kopp emploie un thermomètre dont la boule et la tige ont été jaugées à l'avance. La tige porte, comme à l'ordinaire, des divisions d'égale capacité; la substance y est ensuite introduite à l'état liquide en suivant la méthode habituelle. On la laisse se solidifier et on détermine les volumes successifs qu'elle occupe dans ce thermomètre porté à diverses températures. Le coefficient de dilatation cubique du verre qui forme l'enveloppe thermométrique étant connu, on peut estimer les accroissements absolus de volume pris par le corps solide qui remplit le thermomètre, et avoir facilement une mesure du changement brusque qui accompagne la fusion.



Fig. 173.

La stéarine solide offre cette particularité curieuse: qu'à 50°, son volume diminue subitement dans le rapport de 1 à 0,9775, puis, de 50 à 60° elle se dilate à la façon ordinaire; elle fond à 60°, et, à ce moment, son volume s'accroît tout d'un coup, dans le rapport de 1 à 1,0496.

344. S'agit-il de substances offrant plus de dureté que les précédentes? M. Kopp les introduit, sous forme de cylindres tels que C (*fig.* 173), dans un tube de verre qu'elles remplissent complétement; puis le tube lui-même est placé dans un long réservoir analogue à celui d'un thermomètre et surmonté d'un tube T, de diamètre étroit, gradué en parties d'égal volume. Le tube capillaire est uni au réservoir par un bouchon de liége rendu imperméable aux liquides.

On introduit, dans cette sorte d'appareil thermométrique, un liquide n'agissant pas chimiquement sur le corps solide et dont les dilatations totales sont connues pour les diverses températures qu'on doit parcourir : le liquide employé était, selon le cas, l'eau, l'essence de térébenthine, l'acide sulfurique, etc. Le poids du solide introduit et celui du liquide qui remplissait l'instrument jusqu'au 0 de la graduation étant déterminés à l'avance, on calculait à l'aide des densités les volumes des deux substances à une température déterminée. On comprend alors, qu'en chauffant l'appareil progressivement, avec un bain d'huile et en observant les déplacements do l'extrémité de la colonne liquide dans le tube, il soit facile de suivre, pour ainsi dire, pas à pas, les augmentations de volume du solide, aux différents points de l'échelle thermométrique et notamment, à l'époque du changement d'état.

345. **Résultats.** — Voici les principaux résultats numériques obtenus par M. Kopp, nous les extrayons d'une analyse de son travail donnée par M. Verdet :

	Coefficient de dilatation des corps à l'état solide.	Température de fusion.	Changement brusque de volume pendant la fusion. Dans le rapport de :	Coefficient de dilatation des corps à l'état liquide.
Phosphore................	0,000883	44°	1 à 1,0343	0,000505
Soufre	variable.	115°	1 à 1,0500	0,000527
Cire.	id.	64°	Insignifiant.	0,000866
Acide stéarique	id.	70°	1 à 1,1100	0,000842
Stéarine....................	id.	60°	1 à 1,0496	0,001038
Chlorure de calcium hydraté ($Ca,Cl + 6\ HO$)	id.	29°	1 à 1,0965	0,000490
Phosphate de soude hydraté $2(NaO),HO,PhO^5 + 24\ HO$	id.	350°	1 à 1,0509	0,000435
Alliage fusible de H. Rose. (Bismuth, 2 part.; plomb, 1 part.; Etain, 1 partie.)............	id.	95°	Accroissement rapide mais non subit.	0,000448

Ce dernier corps présente à l'état solide une dilatation maximum vers 60°, puis le volume diminue jusqu'à 95°, température de sa fusion.

Les augmentations brusques de volume manifestées par le chlorure de calcium et le phosphate de soude au moment de leur fusion, malgré la grande quantité d'eau qu'ils renferment, montre que la propriété de se contracter que possède la glace, en fondant, n'amène pas nécessairement un phénomène du même genre dans les combinaisons où entre cette substance.

346. A l'aide de son appareil, M. Kopp a aussi mesuré, la contraction de la glace au moment de la fusion, il a trouvé que son volume variait dans le rapport de 1 à 0,814. La connaissance de ce fait remarquable sert à expliquer plusieurs phénomènes naturels, sur lesquels nous reviendrons à propos de sa solidification.

CIRCONSTANCES QUI MODIFIENT LES LOIS DE LA FUSION.

347. **Des corps qui deviennent pâteux.** — Tous les solides ne passent pas brusquement à l'état liquide ; quelques-uns, avant de fondre, deviennent pâteux : tels sont les verres, les résines, certains alliages, etc. Dans ce cas, la température fixe de fusion ne peut plus être constatée ; il y a comme un ramollissement successif qui amène, par transition lente, le corps de l'état solide à l'état liquide.

348. **Influence de la pression sur le point de fusion de la glace.** — Quand la chaleur fait fondre un corps solide, elle agit, en séparant les molécules et les rend indépendantes, à la manière des forces mécaniques ordinaires. Il était donc naturel d'examiner si, en comprimant les solides, leur point de fusion ne serait pas déplacé.

Dès 1852, M. William Thomson prouvait qu'en comprimant la glace dans un appareil analogue à celui de M. Despretz pour la compressibilité des gaz, le point de fusion de cette substance s'abaissait d'une manière notable. Sous une pression de 17 atmosphères environ, la température de fusion devenait — 0,13. La différence était cependant assez faible pour qu'on pût mettre en doute le résultat annoncé par l'expérimentateur anglais. Les essais, tentés par M. Mousson en 1858, lèvent toute difficulté sur ce point.

349. **Expériences de M. Mousson.** — M. Mousson, pour opérer sous de très-fortes pressions, fut obligé d'enfermer le liquide dans un vase métallique très-résistant. Comme les parois s'opposaient, à cause de leur opacité, à ce qu'on reconnût le moment où la glace changerait d'état, il eut recours à un artifice particulier. Un petit index en métal était, au début de l'expérience, encastré à la partie supérieure d'un cylindre de glace ; on comprimait fortement ce dernier et si la glace devenait liquide, par suite de cette pression, pour se congeler de nouveau un peu plus tard, on devait être averti de cette fusion momentanée par la chute de l'index métallique qui se retrouverait, à la fin de l'expérience, logé dans la partie inférieure du bloc de glace. Dans l'un de ses essais, M. Mousson se servit d'un parallélipipède d'acier P (*fig.* 174), dans lequel était creusée une cavité cylindrique K destinée à contenir la glace. Dans cette cavité, pouvait se mouvoir un piston d'acier A, qui devait comprimer le cylindre d'eau congelée et dont le mouvement était produit par un écrou de même métal E vissé à la partie supérieure du parallélipipède. Le piston et l'écrou mis en place, on renversait l'appareil pour remplir la cavité K d'eau dis-

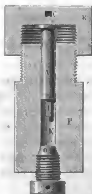


Fig. 174.

tillée ; et on y introduisait un petit cylindre de cuivre I servant d'index qui, tombait au fond de l'eau. On faisait congeler celle-ci ; on redressait l'appareil, après avoir fermé hermétiquement son ouverture inférieure O, et on le portait dans un mélange réfrigérant à — 18°. Lorsque, à la suite d'une immersion suffisamment prolongée, il avait acquis, à coup sûr, la température du mélange, on faisait descendre l'écrou le plus bas possible en le faisant tourner à l'aide d'un levier placé dans le trou C. La compression maximum de la glace ayant été maintenue pendant quelques instants à la température de — 18°, on remontait l'écrou ; on ouvrait en O et on trouvait l'index de cuivre descendu à la partie inférieure O de la cavité. Donc, à cette température si basse, la glace avait dû être fondue.

350. **Expériences de M. Tyndall.** — Cet abaissement du point de fusion de la glace par le fait de la pression, permet d'expliquer une expérience intéressante due à M. Tyndall. M, M (*fig.* 175) sont des disques de bois très-épais creusés de cavités lenticulaires C, C, dans leurs faces en regard. Si l'on interpose entre eux une lame épaisse de glace G et qu'on vienne ensuite à exercer une forte pression, contre les disques, à l'aide d'une presse hydraulique, de manière à les rapprocher ; on constate qu'une lentille de glace parfaitement limpide se forme entre les deux disques et qu'il est possible de l'isoler en séparant les deux lames de bois : la glace s'est moulée, dans les cavités lenticulaires, exactement comme l'eût fait une substance molle. M. Tyndall explique ce résultat par l'abaissement du point de fusion de la glace, conséquence nécessaire de la pression ; une partie de cette substance a été fondue, l'eau liquide provenant de cette fusion a coulé dans les cavités où elle a dû se congeler de nouveau, puisqu'elle n'était plus soumise à aucune action mécanique. En se solidifiant, elle s'est soudée à la glace restante, qui n'avait pas éprouvé de fusion, et qui même s'était refroidie, en cédant de la chaleur à la partie devenue liquide.

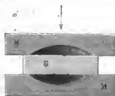


Fig. 175.

Il ne faudrait pas cependant considérer cette explication de l'expérience de M. Tyndall, comme certaine et définitive. M. Faraday a montré, dans une de ses expériences, que deux fragments de glace, mis simplement en contact, sans aucune pression, se soudent intimement, quoique placés dans un milieu dont la température est supérieure à 0°. Il y a donc là, en réalité, un phénomène plus complexe qu'on ne l'avait cru d'abord.

351. La même explication rend compte de la plasticité apparente des glaciers qui descendent, comme on sait, d'une manière progressive des montagnes vers la plaine. Dans leur marche, ils prennent la forme des vallées qu'ils parcourent, ils se rétrécissent quand la vallée se resserre,

s'élargissent quand elle devient plus large; et, malgré ces changements, la masse solide n'est pas brisée en fragments, elle reste continue, comme le ferait un torrent de matière pâteuse qui descendrait le long des flancs de la montagne.

352. Toutefois, l'influence que la pression exerce sur la température de fusion n'agit dans le sens que nous venons d'indiquer, que lorsqu'on expérimente sur des corps qui se contractent en devenant liquides. M. Bunsen a fait voir, qu'en comprimant le blanc de baleine et la paraffine, le phénomène inverse se produit; le point de fusion de ces substances s'élève de plusieurs degrés.

SECTION II

Solidification.

353. La solidification est le passage de l'état liquide à l'état solide. Un liquide soumis à une température décroissante se contracte de plus en plus; il arrive un moment où le refroidissement est devenu tel, que le corps se solidifie brusquement. On peut affirmer que, par un froid suffisamment intense, tous les liquides sont susceptibles d'être congelés; cependant, il en est encore quelques-uns qui ont résisté aux froids les plus grands qu'on sache produire : tel est l'alcool, qui devient simplement visqueux, à des températures voisines de — 100°.

354. **Première loi de la solidification. Température fixe de la solidification.** — *Chaque corps se solidifie à une température déterminée qui est la même que la température de sa fusion.* — De l'eau liquide et de l'eau solide, toutes les deux à 0° et placées dans une enceinte de température constante 0°, garderont invariablement leurs états respectifs; mais, si, par un moyen quelconque, on soustrait de la chaleur à l'enceinte, l'eau liquide se congèlera, et la température des portions qui se solidifient demeurera toujours 0°. Si l'on introduit, au contraire, une certaine quantité de chaleur étrangère, l'eau solide fondra à 0° en conservant toujours sa température primitive. Voilà comment il faut comprendre cette identité des points de fusion et de solidification.

Il est des cas, cependant, où la température de solidification se trouve notablement abaissée. Il se produit alors le phénomène de la surfusion : nous citerons trois circonstances principales dans lesquelles cette anomalie se manifeste.

355. I. *Quand le liquide est abandonné à un refroidissement très-lent et qu'on évite avec le plus grand soin tout ébranlement dans la masse.* — Ainsi, de l'eau distillée bien pure placée dans un milieu où l'agitation de l'atmosphère ne se transmet pas, où les trépidations du sol sont insensibles, peut descendre à — 20° sans se congeler. M. Despretz a même constaté qu'au-

dessous de 0° l'eau continue à se dilater comme elle le fait de 4° à 0° ; mais le moindre mouvement vibratoire, l'introduction de la plus petite aiguille de glace dans la liqueur, suffisent pour amener la congélation partielle de la masse liquide, et tout remonte à 0°. Le phosphore qui fond à 44°,2 peut être facilement amené à la température ordinaire sans se solidifier. Pour rendre cette surfusion manifeste, il suffit de jeter le phosphore dans l'eau à 60°; il tombe au fond du vase et devient liquide : si l'on renouvelle ensuite cette eau avec précaution et qu'on lui substitue de l'eau de plus en plus froide, on peut amener le phosphore à une température même inférieure à la température ordinaire, sans qu'il cesse d'être liquide. M. Ed. Desains, à qui l'on doit, sur ce sujet, de très-curieuses expériences, a pu faire descendre le phosphore liquide à une température tellement basse, qu'au moment de sa solidification brusque, la chaleur latente qu'il restitue est insuffisante, pour le ramener à sa température de fusion.

356. II. *Quand un liquide qui mouille est contenu dans un tube capillaire.* — M. Sorby a constaté, en faisant usage de tubes de verre de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, que l'eau peut être conservée à l'état liquide jusqu'à —17°; passé ce degré, la congélation a lieu, sans qu'il soit nécessaire de recourir à une agitation préalable. Ce résultat explique la résistance qu'opposent à l'action du froid certaines plantes dont les tissus sont traversés par des canaux très-étroits. Les liquides que ces canaux renferment, ne se congèlent pas, quoiqu'ils descendent au-dessous de zéro.

357. III. *Quand certaines dissolutions salines sursaturées sont soustraites à l'action de l'air.* — Dans un tube de verre effilé (*fig.* 176) par un bout, introduisez une solution chaude et concentrée de sulfate de soude dans l'eau ; faites bouillir la dissolution pour chasser l'air du tube et le remplacer par de la vapeur d'eau ; fermez la pointe effilée avec le dard du chalumeau et laissez refroidir la liqueur. Cette dissolution, quoique revenue à la température ordinaire, quoique renfermant plus de sulfate de soude qu'elle n'en peut dissoudre à la température actuelle, ne laissera rien dé-

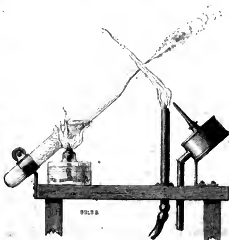


Fig. 176.

poser. Mais, si l'on vient à briser la pointe effilée, l'air extérieur rentre en sifflant, et la liqueur se prend en masse, en dégageant de la chaleur. On voit les aiguilles cristallines se former d'abord à la surface libre du liquide, et de là, s'étendre de plus en plus en rayonnant, jusqu'au point d'envahir la dissolution tout entière.

358. **Deuxième loi de la solidification.** — Pendant toute la durée de la solidification d'un corps, la température ne change pas. Cela tient au dégagement de la chaleur latente. Nous ne donnerons qu'une seule preuve à l'appui de cette explication. C'est le fait cité plus haut de l'eau qui, demeurée liquide à — 20°, remonte subitement à 0°, en se congelant partiellement. Or, aucune source étrangère n'a fourni la chaleur nécessaire pour élever, de 20 degrés, la température de la masse d'eau sur laquelle on expérimentait ; il faut donc admettre que c'est l'eau elle-même qui l'a fournie en se congelant ; la chaleur latente redevient alors chaleur sensible. Nous prouverons d'ailleurs, au chapitre de la Calorimétrie, que, pour un même corps, la chaleur latente dégagée pendant la solidification est exactement égale à la chaleur latente absorbée pendant la fusion.

359. **Cas particulier que présente l'eau au moment de sa solidification.** — *En général, un liquide, en se solidifiant, se contracte.* — Mais il y a des exceptions, et les observations déjà faites à propos de la deuxième loi de la fusion concernent aussi la solidification. Nous n'y reviendrons pas ; nous ajouterons seulement quelques détails sur le phénomène d'expansion présenté par la glace au moment de sa formation. Le poids spécifique de la glace à 0° étant 0,918, tandis que celui de l'eau liquide est 0,999873, on s'explique que, pendant l'hiver, les glaçons flottent à la surface des rivières. En outre, la force d'expansion de la glace étant très-grande au moment de sa formation, on voit pourquoi les vases qui contiennent l'eau se brisent au moment des gelées, pourquoi les jeunes pousses des plantes ont leurs tissus déchirés, dans toutes les directions, quand le thermomètre descend au-dessous de 0°, pendant les nuits froides du commencement du printemps.

360. On peut impunément faire congeler l'eau à la partie inférieure d'une carafe ou d'une bouteille ; l'expansion de la glace se fait librement, et il n'y a point de rupture à craindre pour le vase ; mais, si l'on commence par faire geler l'eau dans le goulot, la glace formée constitue un bouchon très-résistant qui s'oppose dès lors à l'augmentation de volume de la masse placée au-dessous, et les parois du verre sont obligées de s'ouvrir pour laisser un passage au solide dilaté. C'est ainsi, que des canons de bronze, remplis d'eau et puis hermétiquement clos, ont éclaté, avec une sorte d'explosion, au moment de la solidification du liquide qui s'y trouvait emprisonné.

C'est, à une expansion du même genre, que la fonte de fer doit d'être

tout à fait propre au moulage. Au moment où elle devient solide, elle s'insinue d'elle-même, jusque dans les moindres fouillures du moule, où elle avait été coulée.

361. **Cristallisation.** — Dans tout ce qui précède, nous avons étudié le phénomène de la solidification quand il s'effectue d'une manière brusque. Alors, le solide qui a pris naissance est amorphe, quelquefois même il a subi une sorte de trempe ; les molécules intérieures ont pris une position forcée qui ne convient pas à leurs attractions réciproques. Quand, au contraire, le refroidissement est très-lent, la plupart des corps, au moment de devenir solides, s'agrégent d'une manière régulière et constituent des corps polyédriques bien déterminés, que l'on nomme des cristaux. Les formes géométriques qu'on obtient ainsi sont d'un grand secours pour caractériser les espèces chimiques. Il suffit, pour que la cristallisation d'un corps soit bien nette, qu'au moment de la solidification, les molécules aient pu se déposer, sans trouble, en n'obéissant qu'à leurs attractions mutuelles. Il faut, en outre, qu'après la formation des premiers cristaux on fasse écouler le liquide excédant, non encore solidifié, afin que les cristaux ultérieurement formés ne viennent pas s'enchevêtrer avec les premiers et dissimuler leurs formes extérieures. C'est ainsi, que le soufre fondu, abandonné à un refroidissement lent, fournit de très-beaux cristaux aiguillés, si l'on a le soin de briser la couche supérieure, au moment où elle se solidifie et de faire écouler l'excédant de liquide qui baigne les cristaux.

SECTION III

Vaporisation.

362. **Notions générales.** — Tous les liquides, à l'exception de quelques substances qui se décomposent facilement sous l'action de la chaleur, sont susceptibles de se réduire en vapeur, quand leur température est suffisamment élevée. Le mot *vaporisation*, qui exprime, dans son sens le plus général, le passage de l'état liquide à l'état gazeux, est employé, le plus souvent, pour indiquer la formation rapide des vapeurs sous l'influence d'un foyer de chaleur ; — l'ébullition est un cas particulier de la vaporisation — tandis que le mot évaporation est plus particulièrement réservé à désigner la formation lente des vapeurs, à la surface libre d'un liquide abandonné à lui-même. Quelques liquides donnent des vapeurs à toutes les températures ; l'eau est dans ce cas ; la glace même émet de la vapeur ; l'iode, le camphre, etc., jouissent de la même propriété ; ces corps se convertissent en gaz, sans qu'ils aient besoin de passer d'abord par l'état liquide.

363. **Cas particuliers concernant la conversion des liquides en va-**

peur. — D'autres liquides ne donnent des vapeurs qu'à partir d'un certain degré de température. Tel est l'acide sulfurique normal; on peut, à la température ordinaire, placer sous une cloche deux vases juxtaposés renfermant l'un l'acide sulfurique, l'autre un sel de baryte dissous dans l'eau, le chlorure de baryum par exemple, sans que le moindre précipité se manifeste dans la dissolution saline, malgré la grande sensibilité de ce réactif. Toutefois, cette propriété pourrait bien ne s'appliquer qu'à l'acide sulfurique normal additionné d'un très-léger excès d'eau qu'on avait confondu, jusque dans ces derniers temps, avec le premier hydrate de l'acide sulfurique. Le véritable acide monohydraté isolé par M. de Marignac qui donne déjà des fumées sensibles vers 30°, se comporterait tout autrement. Le mercure émet des vapeurs au-dessous de + 10°, mais ces vapeurs ne sont pas diffusibles dans l'atmosphère, elles ne le deviennent qu'à une température plus haute. Ce phénomène a déjà été étudié (141) à propos de l'expansibilité des gaz.

364. Quant aux huiles fixes, huiles d'olive, de colza, d'arachide, etc., elles donnent bien des produits gazeux, quand on les chauffe; mais ces produits ont pour origine la décomposition de l'huile, et non pas sa vaporisation. Si, à la température ordinaire, quelques-unes répandent une odeur, la cause en est due à la présence d'impuretés, de substances étrangères volatiles retenues et dissoutes par l'huile grasse.

Dans tous les cas, la conversion d'un liquide en vapeur se trouve influencée par la pression de l'atmosphère environnante. Il est par suite naturel, si l'on veut découvrir sans difficulté les lois de la vaporisation, d'éliminer, tout d'abord, cette cause perturbatrice et d'étudier, en premier lieu, la formation des vapeurs dans le vide.

365. **Formation des vapeurs dans le vide.** — Le vide le plus parfait qu'on sache obtenir est le vide barométrique; c'est donc dans la chambre du baromètre qu'on devra placer le liquide volatil. A cet effet, deux moyens s'offrent à nous : ou bien, après avoir préparé le tube pour la construction du baromètre, à la façon ordinaire, on achèvera de le remplir, avec une petite colonne du liquide sur lequel on veut opérer, pour le renverser ensuite dans la cuvette; ou bien, quand le baromètre est déjà construit et installé, il faudra faire arriver sous le tube barométrique une petite éprouvette F pleine du liquide voulu (*fig.* 177). Cette éprouvette retournée laissera échapper ce liquide qui, toujours moins dense que le mercure, gagnera sans difficulté la partie supérieure de la colonne mercurielle et se trouvera dès lors en présence du vide.

366. **Première loi.** — *Un liquide se vaporise instantanément dans le vide et fournit, dans un temps très-court, toute la vapeur qu'il peut donner, dans les circonstances de l'expérience.* — Par le second procédé que nous venons d'indiquer, on fait passer dans un baromètre une petite quantité

d'éther ou d'alcool. On voit aussitôt la colonne de mercure se déprimer par la force élastique de la vapeur qui a pris naissance et acquérir immédiatement une hauteur qui ne change plus.

La différence des hauteurs du mercure, dans ce baromètre à vapeur et dans un baromètre ordinaire, donne évidemment la mesure de la force élastique de la vapeur, dans les conditions de l'expérience.

367. **Deuxième loi.** — *Quand la vapeur se trouve dans l'espace vide, en présence d'un excès du liquide générateur, elle possède une tension maxima qu'elle ne peut dépasser, dans aucun cas, tant que sa température demeure constante.* — On établit ce fait important, en recourant à la cuvette profonde qui nous a déjà servi pour la vérification de la loi de Mariotte (165). Au lieu d'air, on intro-

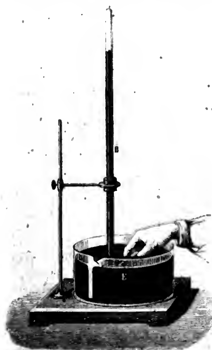


Fig. 177.



Fig. 178.

duit dans le tube (*fig.* 178), avant de le renverser dans la cuvette, un liquide volatil, en quantité assez petite, mais qui doit cependant être suffisante pour qu'il en reste toujours un excès, en contact avec la vapeur. On constate,

qu'en enfonçant ou en soulevant ce tube, le niveau du mercure s'y maintient, à une distance invariable du niveau du mercure de la cuvette. Lorsque en enfonçant le tube, on diminue la capacité de la chambre barométrique, une portion de la vapeur repasse à l'état liquide et la force élastique de la vapeur qui reste n'est pas changée; de même, quand le tube est soulevé, une nouvelle portion de liquide se vaporise. En un mot, la vapeur saturée ne suit nullement la loi de Mariotte.

368. **Troisième loi.** — *La force élastique d'une vapeur saturée croît rapidement, à mesure que la température s'élève.* — Il suffit, pour établir ce fait général par l'expérience, de chauffer, soit avec la lampe à alcool, soit à l'aide d'un manchon plein d'eau chaude, la chambre d'un baromètre quand elle est saturée de vapeur d'éther; on voit aussitôt se manifester une dépression continue de la colonne mercurielle. Si l'on arrive à 37°, température d'ébullition de l'éther, la colonne descend dans le tube jusqu'à ce que son niveau soit sur le même plan horizontal que celui du mercure de la cuvette.

Ce résultat n'est pas particulier à l'éther; il s'applique à tous les liquides; et l'on peut énoncer cette loi : que, *lorsqu'un liquide bout, la force élastique de sa vapeur est égale à celle de l'atmosphère environnante.*

369. **Distinction entre les vapeurs saturées et les vapeurs non saturées.** — Les principes, que nous venons d'établir par le secours exclusif de l'expérience, font concevoir la nécessité d'une distinction radicale entre les vapeurs dites saturées, celles qui sont en présence d'un excès du liquide générateur et les vapeurs non saturées. Pour acquérir des idées tout à fait nettes sur ce point, faisons l'expérience suivante :

Deux baromètres identiques T et T' supportés par la même cuvette (*fig.* 179), plongent dans le même bain M; dans l'un d'eux T' se trouve de l'éther en excès, de façon que le liquide forme, dans la chambre barométrique, une couche d'une certaine épaisseur qui demeure en contact avec la vapeur. Dans le second baromètre T, il n'a été introduit qu'une très-petite quantité du même liquide, quantité tout à fait insuffisante pour donner à la chambre barométrique toute la vapeur qu'elle peut contenir, à la température de l'expérience. — Qu'on mesure, dans ces conditions, avec le cathétomètre les hauteurs des colonnes mercurielles dans les deux tubes; on constatera que la dépression est moindre en T qu'en T', moindre dans le tube, où la vapeur n'est point en contact avec un excès du liquide qui lui a donné naissance. La vapeur non saturée possède donc une tension inférieure à celle de la vapeur saturée.

Allons plus loin. Enfonçons les deux tubes à la fois, et de la même quantité, dans la cuvette; la chambre barométrique se rétrécit dans l'un et dans l'autre; mais la hauteur du mercure dans T' au-dessus du niveau extérieur dans la cuvette n'a pas changé pour cela : la force élastique de

la vapeur saturée y est demeurée invariable, malgré la diminution de son volume. Au contraire, la hauteur du mercure a diminué dans T; la vapeur non saturée a augmenté de tension, quand on a rendu son volume plus petit. Au lieu d'enfoncer T et T', qu'on les soulève; la hauteur mercurielle en T' ne changera pas plus qu'auparavant, tandis qu'elle augmentera en T. La vapeur non saturée aura acquis une tension moindre, par suite de l'accroissement de capacité de la chambre barométrique. De plus, si on mesure, avec soin, aux différentes époques de l'expérience, les volumes et les pressions correspondantes de la vapeur contenue dans T, on voit que la loi de Mariotte se vérifie assez exactement. En un mot, les vapeurs non saturées se comportent comme les gaz ordinaires, et cela est vrai non-seulement quand on fait varier leur volume, mais encore leur température.

370. Complétons notre expérience : faisons passer, peu à peu, dans T une nouvelle quantité d'éther, la force élastique de la vapeur non saturée ira progressivement en croissant et tendra vers un maximum qu'elle ne pourra atteindre, qu'au moment, où il y aura un excès persistant de liquide dans la chambre barométrique; la vapeur non saturée, qui était primitivement comparable à un gaz, se sera convertie en vapeur saturée. Cette dernière partie de l'expérience fait concevoir la raison de ce mot *tension maxima* si souvent employé, pour désigner la force élastique des vapeurs, en contact avec leur liquide générateur.

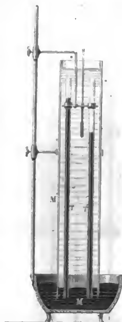


Fig. 179.

371. **Identité des gaz et des vapeurs.** — Les faits qui précèdent étendent nos idées sur la vraie nature des corps gazeux. En définitive, ils amènent à penser que les gaz sont des vapeurs non saturées qui n'ont besoin, pour atteindre leur point de saturation et devenir des liquides que d'un abaissement convenable de température. Les expériences de Faraday sont d'ailleurs parfaitement d'accord avec cette manière de voir. Elles montrent bien que la forme gazeuse est purement accidentelle, et qu'elle n'est pas inhérente à la substance; l'acide sulfureux est un gaz dans les régions équatoriales, c'est un liquide dans les contrées voisines du pôle. Nous reviendrons sur ces notions générales, en étudiant les procédés de liquéfaction des gaz.

TENSION DE LA VAPEUR D'EAU AUX DIVERSES TEMPÉRATURES.

372. La vapeur d'eau joue un rôle si important dans les phénomènes météorologiques ; en outre, elle est si souvent employée aujourd'hui comme force motrice, qu'il était indispensable de mesurer, avec soin, les tensions de cette vapeur correspondantes aux diverses températures.

373. I. **Tensions de la vapeur aqueuse entre — 32° + et 50°. — Méthode de Dalton.** — C'est en mesurant la différence des hauteurs du mercure dans un baromètre ordinaire et dans un baromètre à vapeur que Dalton, Gay-Lussac et Kœmtz estimèrent, chacun de leur côté, les forces élastiques de la vapeur d'eau au-dessous de 100°.

L'appareil de Dalton est représenté dans la figure 180. Le manchon de verre M′ qui entoure les deux baromètres contient de l'eau qu'on y introduit, suivant les cas, à différentes températures. On agite le bain liquide afin de mélanger intimement ses différentes couches ; et, lorsqu'en se refroidissant, il atteint la température voulue, on mesure au cathétomètre, la distance verticale du niveau du mercure dans le baromètre ordinaire T et dans le baromètre à vapeur T′. En ramenant à 0° la hauteur trouvée, on a, en longueur de colonne mercurielle, la force élastique de la vapeur d'eau à la température de l'expérience. Malheureusement, la méthode de Dalton, très-simple en elle-même, ne permet point des déterminations précises. La température est toujours mal connue dans une colonne d'eau aussi profonde que l'est celle du manchon M′ ; puis, l'observation des niveaux en T et T′ est sujette à des erreurs de réfraction, qui tiennent au passage successif des rayons lumineux à travers l'eau, le verre et l'air.

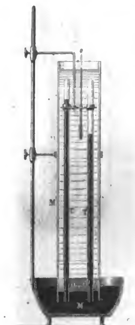
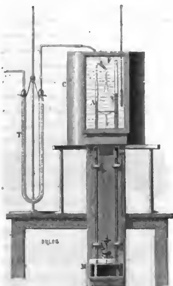


Fig. 180.

374. **Perfectionnements apportés à la méthode de Dalton.** — La méthode de Dalton, qui comportait, on le voit, plusieurs causes d'erreur difficiles à éliminer, a acquis entre les mains de M. Regnault une grande précision. Voici l'un de ses appareils : deux baromètres tout à fait semblables (*fig.* 181), ayant un diamètre intérieur de 14 millimètres et plongés dans la même cuvette M sont appliqués, l'un à côté de l'autre, contre un support de bois vertical. Ils pénètrent dans une caisse de tôle galvanisée C,

mesurant une capacité de 45 litres environ et remplie d'eau, par deux tubulures *m*, *m'* pratiquées à la partie inférieure de cette caisse. L'un des baromètres communique, par l'intermédiaire d'un tube de cuivre à trois branches, 1° avec un ballon d'une capacité de 500 centimètres cubes contenant à l'avance une petite ampoule fermée à la lampe et pleine d'eau récemment bouillie, 2° avec un tube en U, à ponce sulfurique T qui aboutit lui même à la platine de la machine pneumatique. La paroi antérieure de la caisse de tôle est percée d'une fenêtre fermée par une lame de cristal F, à faces parallèles, à travers laquelle on peut mesurer plus exactement que tout à l'heure, à l'aide du cathétomètre, la différence des niveaux du mercure dans les deux baromètres.


Fig. 181.

375. **Marche des expériences.** — L'appareil ainsi installé, on fait le vide un grand nombre de fois dans le ballon et par suite dans la chambre barométrique. Afin de dessécher aussi complétement que possible les parois intérieures de ces deux enceintes, on laisse, chaque fois, rentrer lentement l'air qui a passé sur la ponce sulfurique. Le vide le plus parfait que donne la machine étant obtenu une dernière fois, le tube de jonction est fermé au chalumeau et l'eau de la caisse est remplacée par de la glace fondante. La différence des hauteurs du mercure dans les deux baromètres, donne à ce moment, la force élastique de l'air sec, qui reste à 0° dans le baromètre A, elle ne dépasse guère un millimètre. On écarte les fragments de glace qui entourent le ballon, et, par la chaleur de quelques charbons incandescents, on détermine la rupture de l'ampoule. Le tout est porté de nouveau à 0° ; les mesures cathétométriques donnent, en colonne mercurielle, la somme des forces élastiques de l'air sec et de la vapeur d'eau à cette température. Retranchant de cette somme la première de ces forces élastiques qui est déjà connue, on obtient la tension de la vapeur aqueuse à 0°.

376. Pour des températures plus élevées, la marche à suivre est semblable ; on remplace la glace pilée par l'eau pure ; et lorsqu'il s'agit de dépasser, de beaucoup, la température de l'air ambiant, on chauffe la paroi inférieure de la caisse avec une lampe à alcool. En réglant convenablement la combustion de l'alcool, il devient facile de maintenir l'eau de

la caisse à une température stationnaire; il suffit d'arriver, par tâtonnement, à ce résultat : que l'alcool en brûlant fournisse à la caisse autant de chaleur que lui en enlève, dans le même temps, le rayonnement dans l'atmosphère.

377. II. **Forces élastiques de la vapeur d'eau au-dessous de zéro. — Principe du condenseur de Watt.** — Dans ses déterminations, Gay-Lussac prenait comme point de départ, le principe théorique que Watt avait si ingénieusement utilisé dans les machines à vapeur. Voici ce principe : lorsqu'un liquide émet de la vapeur dans une enceinte dont les différentes parties n'ont pas la même température, le liquide distille peu à peu de la région plus chaude où il est placé vers la région plus froide dans laquelle il finit par arriver en totalité; et si la disposition de l'enceinte permet au liquide distillé de ne pas retomber dans le compartiment le plus chaud, la force élastique finale de la vapeur représente la tension maxima correspondante au point le plus froid de l'enceinte.

Ce principe est évident de lui-même; l'équilibre exige, en effet, que le fluide élastique contenu dans l'enceinte exerce, en chacun de ses points, la même pression; or, la portion de ce fluide qui arrive des points les plus chauds du vase, se liquéfie, en partie, en pénétrant dans la région la plus froide; sa force élastique diminue, l'équilibre n'est pas possible, et la vapeur plus chaude arrive pour remplacer la vapeur liquéfiée; elle se condense à son tour, et la distillation du liquide vers la région la plus froide doit se continuer, jusqu'à ce que la vapeur ait partout la pression la plus faible, celle qui convient à la température de la région la plus froide.

378. **Méthode de Gay-Lussac.** — Partant de là, Gay-Lussac se servait pour la mesure des forces élastiques de la vapeur d'eau au-dessous de 0°, d'un appareil analogue à celui de Dalton, il faisait plonger seulement l'extrémité recourbée du baromètre à vapeur dans un mélange réfrigérant R (*fig.* 182) de température connue. Toute l'eau qu'on introduisait en T' allait se solidifier à la partie extrême du tube dans la région la plus froide, et la tension finale de la vapeur, qu'on évaluait par la différence des niveaux en T et T', était celle qui correspondait à la température du mélange réfrigérant.



Fig. 182.

379. **Perfectionnements apportés par M. Regnault.** — M. Regnault n'a eu qu'à modifier légèrement l'appareil déjà décrit (374), pour l'appliquer au cas actuel; la caisse est remplacée par une cloche de verre de 20 litres de capacité, remplie d'une dissolution concentrée de chlorure de calcium et dans laquelle plonge le

ballon tout entier. En jetant, de temps en temps, des fragments de glace dans la dissolution du chlorure, on abaisse progressivement la température jusqu'à — 32°. On peut à volonté, la rendre stationnaire par l'addition, en temps utile, soit d'une petite quantité de la dissolution saline, soit de petits morceaux de glace. La force élastique de la vapeur dans la chambre barométrique placée en dehors du mélange réfrigérant est toujours la même que dans le ballon, et il n'y a qu'à mesurer, comme dans l'expérience de Gay-Lussac, la différence des niveaux en T et T' (*fig.* 183), pour avoir la force élastique cherchée.

380. M. Regnault s'assurait toujours, par des expériences directes, dans les évaluations de tension qu'il a effectuées aux températures supérieures à 0° (376), que la chambre barométrique remplie par la vapeur, avait bien, dans tous les points, la même température que le bain.

Quand une portion de l'eau venait distiller à la surface du mercure et la recouvrait, il tenait compte de l'action capillaire spéciale exercée par la petite colonne d'eau condensée. Enfin, en relevant au cathétomètre, les distances entre un point de repère marqué sur le baromètre ordinaire et une série de traits équidistants tracés sur le baromètre mouillé, soit avant, soit après l'interposition de la lame de verre F, il pouvait effectuer les corrections dues aux déviations des rayons lumineux, déviations qui avaient pour cause le non-parallélisme des deux faces de cette lame.

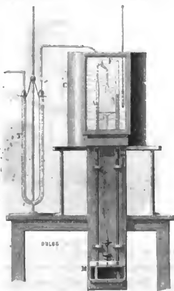


Fig. 183.

381. III. Tension de la vapeur aqueuse entre + 50° et + 230°. — En 1829, Dulong et Arago déterminèrent les forces élastiques de la vapeur d'eau, jusqu'à la température de 224°, en utilisant le manomètre à air comprimé dont nous avons parlé (169) et avec lequel ils avaient déjà vérifié la loi de Mariotte pour de hautes pressions; mais la sensibilité de leur appareil, qui allait en décroissant comme nous l'avons expliqué, et la difficulté d'évaluer exactement la température de la vapeur, dans une chaudière, où cette température variait sans cesse, rendaient un peu incertaines les déterminations numériques obtenues par les deux illustres physiciens.

M. Regnault a eu recours à la méthode de l'ébullition qu'avaient déjà em-

ployée, pour des températures peu élevées, Dulong et Arago. En voici le principe : Un liquide placé dans une chaudière complétement close ne peut jamais bouillir, puisque la force élastique de la vapeur qu'il dégage, s'ajoute à celle de l'atmosphère déjà contenue dans la chaudière, et rend sans cesse croissante la pression exercée sur le liquide; par suite, ni la température du liquide ni celle de la vapeur ne sauraient demeurer stationnaires. Mais que, d'une part, on mette en relation la chaudière C (*fig.* 184)



Fig. 184.

avec un grand réservoir B qui soit entouré d'eau froide et qui renferme une atmosphère artificielle dont on peut faire varier la pression arbitrairement; que, d'autre part, on fasse communiquer ce réservoir par l'intermédiaire d'un tube F, soit avec une machine pneumatique, soit avec une pompe foulante, et qu'on mesure la force élastique de l'atmosphère, qu'il contient, à l'aide du manomètre à air libre K déjà décrit (189) ; on voit que la vapeur formée dans la chaudière, ira sans cesse se condenser dans le tube T refroidi par un courant d'eau et dans le réservoir B entouré lui-même d'eau froide pour retomber ensuite dans la chaudière. Elle ne pourra donc, dans aucun cas, faire varier la pression de l'atmosphère artificielle.

382. L'ébullition de l'eau sera ainsi maintenue aussi longtemps qu'on voudra, et la température de la vapeur s'estimera très-exactement par l'observation de plusieurs thermomètres; ceux-ci, au nombre de quatre, ne peuvent pas être immergés directement dans la vapeur, car leurs réser-

voirs seraient plus ou moins déformés par la pression de ce fluide élastique, et dès lors les indications de température seraient fautives. Les thermomètres sont plongés dans le mercure, qui remplit quatre tubes de fer fermés par le bas, solidement fixés au couvercle de la chaudière et plongés soit dans l'eau de la chaudière, soit dans la vapeur. — Ainsi, en premier lieu, la température de la vapeur aqueuse sera parfaitement connue.

D'un autre côté, comme, au moment de l'ébullition d'un liquide, la force élastique de la vapeur est toujours égale à celle de l'atmosphère environnante, il s'ensuit que les indications du manomètre à air libre fourniront exactement les valeurs de la tension de la vapeur aqueuse. — Les deux éléments qu'il s'agit de comparer seront ainsi obtenus, l'un et l'autre, avec toute la précision désirable.

383. **Résultats généraux.** — Il n'existe pas de relation simple entre la température de la vapeur d'eau et sa tension ; il a fallu construire des tables dans lesquelles se trouvent, en regard, les valeurs numériques correspondantes de ces deux éléments. Voici quelques-uns des nombres obtenus par M. Regnault :

TEMPÉRATURE.	TENSION EN MILLIMÈTRES.
— 32°	0,320
25	0,605
15	1,400
5	3,113
0	4,600
+ 10	9,165
15	12,699
20	17,391
50	91,982
100	760,000
121	1539,250
134	2288,920
144	3040,260
152	3777,740
159	4534,360
165	5274,540
200	11688,960
230	20926,400

On remarquera, à l'inspection de ce tableau, que la force élastique de la vapeur d'eau croit beaucoup plus rapidement que la température ; à 100°, la tension est d'une atmosphère; à 121°, de 2 atmosphères environ ; à 134°, de 3 ; à 144°, de 4 ; et à 230°, elle est déjà de plus de 27 atmosphères.

384. **Formules empiriques.** — On a cherché quelle était la formule empirique qui pouvait le mieux représenter les nombres trouvés par l'expérience. Dulong et Arago avaient déjà donné l'équation $F = (1 + 0{,}07153\,t)^5$, dans laquelle on prend pour origine des températures, celle de 100°, pour

unité de température l'intervalle de 0° à 100°, et enfin pour unité de force élastique, une atmosphère (760^{mm}). M. Regnault a représenté l'ensemble de ses observations par une formule à deux exponentielles qui avait été indiquée par M. Biot et de la forme :

$$\text{Log } F = a - b\alpha_1^T - c\beta_1^T$$

dans laquelle $T = t + 20$; t étant la température centigrade comptée à partir de la glace fondante. Les constantes a, b, c, α_1, β_1, ont été calculées à l'aide de cinq groupes de valeurs correspondantes de T et de F.

385. **Applications. — Hypsomètre.** — Les forces élastiques de la vapeur d'eau dans le voisinage de 100°, ont été mesurées, avec un soin tout particulier, par MM. Marié, Izarn, Bravais et Martin, en faisant bouillir de l'eau à diverses hauteurs sur les montagnes ; un thermomètre très-sensible donnait la température de la vapeur, en même temps que le baromètre placé à la même station donnait sa force élastique.

386. Les nombres ainsi obtenus s'accordent très-bien avec ceux qu'on déduit de la formule empirique adoptée par M. Regnault ; car les plus grandes différences entre les températures observées et les températures calculées montent à peine à 0,05 de degré centigrade.

La table qui donne les forces élastiques de la vapeur d'eau pour chaque variation de $\frac{1}{10}$ de degré de 85 à 101°, permet de substituer le thermomètre au baromètre, pour la mesure de la hauteur des montagnes. On emploie, dans ce but, un petit instrument qu'on a nommé *hypsomètre.* Il se compose de plusieurs tuyaux cylindriques, s'emboîtant l'un dans l'autre, comme ceux d'une longue-vue à plusieurs tirages ; le tuyau inférieur porte une petite chaudière remplie d'eau distillée, qu'on peut faire bouillir, avec une lampe à alcool placée en dessous. Le tuyau supérieur percé de deux trous pour laisser sortir la vapeur, soutient le thermomètre qui y est fixé à l'aide d'un bouchon. Quand l'eau bout, on note l'indication stationnaire du thermomètre, et on trouve dans la table, dont nous venons de parler, la pression correspondante de l'atmosphère, qu'eût donnée un baromètre placé à la même station. — Cette même table servira encore à fixer, avec rigueur, le second point fixe d'un thermomètre qu'on veut graduer ; il suffira, cette fois, de consulter le baromètre au moment où le thermomètre plonge dans la vapeur d'eau bouillante, et la table en question donnera la vraie température à inscrire.

MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

387. **Tension des vapeurs dans les gaz.** — La pression d'un gaz placé au-dessus d'un liquide retarde la volatilisation de ce dernier, mais n'influe

en rien sur la force élastique finale de la vapeur formée; *quand l'espace limité qui renfermait une atmosphère gazeuse se trouve saturé, la tension de la vapeur qui a pris naissance est la même que dans le vide, à la même température.*

388. **Appareil de Gay-Lussac.** — Gay-Lussac a démontré par l'expérience cette loi que Dalton avait le premier formulée. Son appareil, analogue à celui qui a servi à la démonstration de la loi de Mariotte, se compose d'un récipient à capacité constante, où l'on fait pénétrer successivement le gaz et la vapeur, afin de mesurer leurs tensions par l'emploi d'une colonne de mercure. Le gaz sec auquel la vapeur doit être mélangée, est introduit, à la façon ordinaire, dans un ballon B (*fig.* 185) muni d'un robinet de fer R. Ce ballon est vissé à la garniture supérieure d'un tube de verre A assez large, portant à ses deux extrémités des robinets de fer R′, R″ et communiquant latéralement, par le bas, avec un tube de verre plus étroit C. Les tubes A et C, étant d'abord remplis de mercure, on ouvre les trois robinets R, R′, R″; le liquide s'écoule par R″ et le gaz passe en partie du ballon dans le tube A ; seulement, il s'y trouve à une pression moindre que la pression atmosphérique extérieure. Mais il suffit de fermer R′, R″ et de verser du mercure par la branche ouverte C, l'égalité des niveaux du mercure dans les deux tubes se rétablit bientôt et par suite, l'égalité de pression du gaz confiné et de l'air ambiant. A ce point de l'expérience, on note le volume occupé par le gaz et on visse, à la place du ballon, un robinet R‴ dont le noyau est creusé d'une cavité conique O. Le liquide versé dans cette cavité pénètre au sein de la masse gazeuse, lorsqu'on fait tourner le robinet de 180°; et cette introduction s'effectue, sans qu'il y ait eu communication possible du gaz intérieur avec l'air extérieur. Peu à peu, le liquide se volatilise et la vapeur formée fait baisser le niveau du mercure en A pour le faire monter en C. Quand les colonnes sont stationnaires en *m* et en *n*, on rend le volume actuel du mélange égal au volume primitif qu'occupait le gaz seul ; dans ce but, on verse du mercure par la branche C; il ne reste plus alors qu'à noter la différence des hauteurs du mercure dans les deux tubes. On trouve que, dans tous les cas, cette diffé-

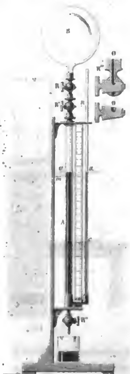


Fig. 185.

rence est égale à la tension maxima que posséderait la même vapeur dans le vide, à la même température. — Donc la tension du mélange est égale à la somme des tensions qu'auraient le gaz et la vapeur, si chacun d'eux occupait seul le volume du mélange.

389. **Appareil de M. Regnault.** — M. Regnault a pu vérifier la même loi, à des températures très-diverses, en se servant de l'appareil déjà décrit (*fig.* 186), avec la seule précaution, de substituer, aux deux baromètres, le manomètre ordinaire à deux branches (189). Le ballon contenant l'ampoule communique avec la branche T' de ce manomètre. Au lieu de faire un vide à peu près complet, on laisse rentrer de l'air sec qui occupe, sous une pression connue, le volume du ballon et celui du tube jusqu'à un repère fixe. L'ampoule étant brisée, le mélange d'air et de vapeur est porté à la température voulue; il n'y a plus alors qu'à ramener le niveau du mercure au même repère que précédemment, et la différence des hauteurs du mercure dans les deux branches du manomètre donne la pression totale du mélange. On la trouve toujours égale à la somme des forces élastiques que prendraient le gaz et la valeur si chacun d'eux était seul dans l'espace occupé par le mélange.

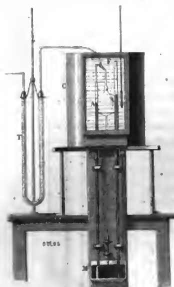


Fig. 186.

390. **Conséquences de la loi de Dalton.** — La loi de Dalton montre que le mélange d'une vapeur avec un gaz est un phénomène identique à celui de la diffusion des gaz, les uns dans les autres. Chaque fluide élastique peut être alors considéré, comme agissant exclusivement sur ses propres molécules, et dès lors il se répand dans tout l'espace qui lui est offert, comme il le ferait, si cet espace était vide de toute matière pondérable. Il suit de là que, lorsqu'on aura à calculer les changements de volumes subis par des mélanges de gaz et de vapeurs, à la suite des variations de la température et de la pression, on n'aura à s'occuper que du gaz, comme s'il était seul, pourvu qu'on lui attribue dans les calculs, sa véritable pression qui sera toujours la différence entre la force élastique du mélange et la tension de la vapeur. Voici quelques applications de la loi de Dalton.

391. PROBLÈME I. — V_t étant le volume d'un mélange d'air et de vapeur d'eau à la température t et sous la pression H, quel sera le volume $V_{t'}$ du-

même mélange à la température t' et sous la pression H' : on suppose, dans les deux cas, l'air saturé de vapeur.

On cherchera, dans les tables, les tensions maxima F_t, $F_{t'}$ de la vapeur d'eau aux températures t et t', et dès lors le problème pourra être ramené à la forme suivante : sachant que V_t est le volume d'une certaine masse d'air sec à la température t et sous la pression $H - F_t$, chercher quel sera le volume $V_{t'}$ de cet air à la température t' et sous la pression $H' - F_{t'}$. On aura, en appliquant une formule connue (260) :

$$V_{t'} = V_t \frac{H - F_t}{H' - F_{t'}} \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

392. Problème II. — De même, pour calculer le poids d'un certain mélange de gaz et de vapeur, on évaluera séparément le poids du gaz et le poids de la vapeur, comme si chacun des fluides occupait le volume total du mélange avec la force élastique qui lui est propre. Exemple : Trouver le poids d'un litre d'air saturé de vapeur d'eau à la température t et sous la pression H.

On estimera d'abord le poids x du litre d'air sec à la température t et sous la pression $H - F_t$.

$$x = 1^{gr},293 \frac{H - F_t}{760} \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Ensuite, le poids x du litre de vapeur d'eau sera calculé, en considérant cette vapeur comme de l'air sec, à la température t et à la pression F_t, et on multipliera le nombre ainsi obtenu par la densité D de la vapeur d'eau par rapport à l'air.

$$y = 1^{gr},293 \frac{F_t}{760} \times \frac{D}{1 + \alpha t}.$$

Le poids cherché P sera la somme de ces deux poids $x + y$.

$$P = \frac{1^{gr},293}{760(1 + \alpha t)} [H - F_t(1 - D)],$$

et comme D égale sensiblement $\frac{5}{8}$, on peut écrire :

$$P = \frac{1^{gr},293}{760(1 + \alpha t)} \left(H - \frac{3}{8} F_t\right).$$

392 *bis*. **Densités des vapeurs.** — A la suite de l'étude que nous venons de faire des forces élastiques des vapeurs dans le vide et dans l'air, se placerait naturellement la mesure de leurs densités. Les limites de ce cours nous empêchent de traiter cette question qui comporterait d'assez longs développements ; nous nous contenterons de dire ici que les densités des vapeurs

sont rapportées à celles de l'air, comme dans le cas des gaz ordinaires, et que leur détermination se fait maintenant par un procédé très-simple qui est dû à M. Dumas. Au reste, nous avons exposé, avec détail, à propos des pyromètres à gaz (326), et le principe de la méthode et les calculs qu'elle entraîne. Il nous suffira de réunir, en un tableau, les résultats numériques qui concernent les vapeurs le plus fréquemment employées :

Vapeur d'eau	0,622
— d'alcool	1,61
— d'éther sulfurique	2,58
— de soufre	2,2
— de phosphore	4,4
— d'iode	8,7
— de mercure	6,97

ÉBULLITION.

Jusqu'ici, nous avons examiné les vapeurs, au point de vue de leurs tensions, sans nous préoccuper de leur origine. L'ébullition et l'évaporation, qui représentent les deux modes ordinaires de production de la vapeur, sont cependant deux phénomènes importants à étudier de près, car ils nous fournissent des lois générales.

393. **Ébullition.** — Un liquide contenu dans un vase est soumis à l'action d'une source calorifique quelconque, les parois du vase s'échauffent les premières et transmettent ensuite directement la chaleur qu'elles ont reçue au liquide qui les touche. Cette transmission rend moins dense la couche liquide en contact, qui s'élève vers la partie supérieure du vase et prend la place d'une couche plus froide; il se fait ainsi, par une succession continue de courants liquides dans la masse, une répartition assez prompte de la chaleur venue de la source. En même temps, de la surface du liquide se dégage sans cesse de la vapeur dont la force élastique qui va croissant correspond, à chaque instant, à la température du liquide. Il arrive enfin un moment où des bulles nombreuses se montrent sur les parties les plus chaudes de la paroi, elles se renouvellent sans cesse et traversent la masse liquide pour venir crever à sa surface. Cette formation tumultueuse de bulles de vapeur prenant naissance au sein du liquide pour se dégager ensuite dans l'atmosphère, constitue le phénomène de l'*ébullition*.

394. **Lois de l'ébullition.** — 1° *Pour une substance liquide de composition invariable, il y a fixité dans le point d'ébullition, quand on opère toujours sous la même pression et dans un vase de même nature.* — Cette loi signifie qu'un thermomètre plongé dans la vapeur qui s'échappe du liquide, marque une température fixe. Cette fixité de la température d'ébullition de l'eau nous a permis d'obtenir avec rigueur le point 100 du thermomètre à

mercure; nous avons décrit le mode d'expérience, il n'y a pas à y revenir.

La variabilité du point d'ébullition est un signe qu'on a affaire à un mélange de plusieurs substances inégalement volatiles ou bien à un liquide qui se décompose progressivement sous l'influence de la chaleur.

395. 2° *Quelle que soit l'ardeur du foyer qui sert à échauffer un liquide, la température de ce dernier demeure invariable, pendant toute la durée de l'ébullition.* — Ici, comme dans le cas de la fusion, la chaleur donnée par la source est uniquement employée à convertir le liquide en gaz; elle devient *chaleur latente de vaporisation*. Nous la mesurerons dans le chapitre de la calorimétrie.

396. **Congélation de l'eau dans le vide.** — Ce phénomène d'absorption de chaleur, *au moment de la vaporisation* rapide d'un liquide, nous permet d'expliquer une expérience due à Leslie et qu'on fait depuis longtemps dans les cours; celle de la congélation de l'eau sous la cloche de la machine pneumatique, par le seul fait de la raréfaction de l'air qui presse sur le liquide. Une petite quantité d'eau étant déposée sur un corps mauvais conducteur de la chaleur, un disque de liége noirci, creusé d'une cavité, par exemple; on place au-dessous du disque une large capsule de verre pleine d'acide sulfurique concentré. Il n'y a plus alors, par la manœuvre de la machine, qu'à produire et à entretenir la raréfaction du milieu qui entoure l'eau, pour voir le liquide diminuer de volume en se vaporisant et, un peu plus tard, se congeler en masse. La vapeur se trouve, à chaque instant, absorbée par l'acide sulfurique; un vide à peu près complet persiste au-dessus de l'eau dont la conversion en vapeur est incessante; et, comme aucune source étrangère ne lui fournit la chaleur dont elle a besoin pour se vaporiser, elle la prend à elle-même, abaisse sa propre température jusqu'à 0°, et dès lors la portion du liquide qui reste se solidifie.

Dans cette expérience, l'eau est quelquefois placée dans une capsule de cuivre à parois minces. Le disque de liége vaut mieux; d'abord sa substance conduit très-mal la chaleur; puis, l'eau ne mouille pas la surface du disque recouverte de noir de fumée; alors le liquide est comme suspendu et isolé dans le vase qui le contient, et il ne peut emprunter, qu'à lui-même, la chaleur dont il a besoin pour se convertir en vapeur. Il est bon aussi que la cloche au-dessous de laquelle l'appareil est placé soit très-petite, afin que la vapeur soit plus rapidement absorbée par l'acide sulfurique.

397. **Circonstances qui influent sur la température d'ébullition. — 1° Influence de la pression atmosphérique.** — Nous savons par les expériences citées (368), et par les applications que nous en avons déduites (381), que la force élastique de la vapeur, fournie par un liquide qui bout, est toujours égale à la pression de l'atmosphère environnante. La température d'ébullition croîtra donc et décroîtra en même temps que cette pression.

398. Une expérience très-simple due à Franklin permet de le démon-

trer : on fait bouillir de l'eau dans un ballon M (*fig.* 187), assez longtemps pour que la vapeur ait expulsé l'air placé au-dessus du liquide ; puis, on bouche le ballon et on le renverse dans la position qu'indique la figure. Dès que l'on refroidit avec un linge mouillé la chambre à vapeur A, une ébullition des plus vives se manifeste, quoique la température de l'eau soit de beaucoup inférieure à 100°. Le froid produit a eu pour effet de liquéfier la vapeur d'eau contenue dans l'espace A, et par suite de diminuer la pression qui s'exerce sur le liquide. De même, on peut faire bouillir de l'eau à une température bien inférieure à 100°, sous le récipient de la machine en raréfiant l'air à un degré convenable.

399. Ce résultat s'explique très-bien, en remarquant : qu'une bulle de vapeur, au sein d'une masse liquide, représente un petit ballon dont les parois sont constituées par une pellicule liquide qui persiste encore quelques instants, quand la bulle est parvenue à la surface libre. Pour que ce petit ballon puisse subsister, il faut que la pression du gaz intérieur qu'il renferme soit égale à la pression extérieure qu'il supporte. Or, cette pression extérieure provient et du poids du liquide et de la pression atmosphérique ; la température de la vapeur devra donc être telle que sa force élastique soit égale à la somme de ces deux forces.

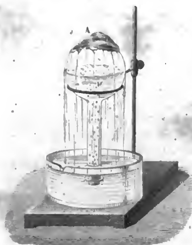


Fig. 187.

400. 2° **Influence de la profondeur du liquide dans le vase.** — Un thermomètre placé au fond d'un vase profond, où l'eau est en ébullition, marque plus de 100° quand la pression atmosphérique égale 760^{mm}.

Il est bon de remarquer que dans ce cas, comme dans tous ceux qui vont suivre, un autre thermomètre plongé dans la vapeur qui s'échappe du vase n'indiquerait que 100°. Toutefois, pour que ce dernier résultat puisse être bien mis en évidence, une condition assez délicate doit être remplie : il faut que le thermomètre qui est plongé dans la vapeur soit à l'abri des rayonnements de la chaleur et des projections de liquide. Quoiqu'il en soit, la température d'ébullition de l'eau sera influencée par une seconde cause : la profondeur du liquide dans le vase. Aussi dans l'appareil qui sert à obtenir le deuxième point fixe dans les thermomètres, a-t-on soin de ne placer au fond du récipient élargi que 3 ou 4 centimètres d'eau.

401. 3° **Influence de la pureté du liquide.** — En général, quand l'eau renferme en dissolution des matières salines, sa température d'ébullition dépasse d'autant plus 100°, que la proportion de ces matières est plus considérable; ainsi, un thermomètre plongé dans une dissolution saturée et bouillante de sel marin marque 108°,5. En ajoutant, à l'eau, une suffisante quantité de chlorure de calcium, on peut atteindre la température de 180°. Au contraire, en mélangeant avec l'eau des liquides plus volatils, on en abaisse notablement le point d'ébullition. Dans ce cas, rentrent toutes les liqueurs alcooliques: le vin, la bière, etc.

402. 4° **Action exercée par la paroi du vase.** — Dans les ballons et les cornues de verre, l'eau bout toujours, quoique sous la pression normale, à une température supérieure à 100°. L'excès est d'un degré environ; cela tient à l'adhérence qui s'établit entre le liquide et la surface vitreuse. La force élastique de la vapeur devant alors triompher de la pression de l'atmosphère, de celle du liquide et en outre de cette force adhésive, la température sera plus élevée que si cette dernière force n'existait pas. On n'a qu'à projeter, au fond du vase, quelques poussières métalliques, pour voir la température d'ébullition retomber au degré ordinaire; ajoutons que c'est même, grâce aux poussières déposées par l'air ambiant dans les vases de verre, que la température d'ébullition de l'eau ne dépasse guère dans ces vases 101°. Si par un lavage préalable du ballon avec un acide fort ou un alcali, on détruit ces poussières, l'excès de température peut atteindre 4 ou 5 degrés.

403. 5° **Influence exercée par la viscosité du liquide.** — Son effet est de faire varier, par saccades, la température d'ébullition. Que dans la tubulure d'une cornue à moitié pleine d'acide sulfurique, on adapte un thermomètre, qui permette de juger de la température de ce liquide, et qu'on chauffe cette cornue d'une manière progressive; on constatera, qu'au moment de l'ébullition, les bulles de vapeur, au lieu de se détacher du fond du vase au fur et à mesure de leur formation, grossissent de plus en plus jusqu'à une certaine limite; puis, ne pouvant traverser la masse liquide à cause de sa viscosité, elles la soulèvent et après leur dégagement dans l'atmosphère, la laissent retomber de tout son poids contre le fond de la cornue: c'est là le phénomène des soubresauts, cause fréquente de la rupture des récipients. A mesure que la bulle de vapeur grossit, le thermomètre qui est dans le liquide accuse une élévation de température, à laquelle succède un abaissement de plusieurs degrés, aussitôt que la bulle s'est dégagée. Il y a certainement ici complication de causes; car la viscosité du liquide et son adhésion contre le verre doivent agir simultanément, dans le même sens. On évite les soubresauts, en plaçant la cornue au centre d'une double grille circulaire qui sert de foyer, de manière à ce que le liquide soit chauffé par le rayonnement des charbons incandescents, uniquement dans

le voisinage de la surface. Des phénomènes du même genre se produisent avec l'éther et l'alcool, liquides, peu visqueux il est vrai, mais qui adhèrent fortement à la paroi, parce qu'ils sont capables de dissoudre les matières grasses qui empêcheraient leur contact immédiat avec le verre.

404. **Expérience de M. Donny.** — Au reste, la seule force de cohésion, dans un liquide comme l'eau, suffit pour retarder considérablement, sous certaines conditions, l'ébullition de ce liquide. M. Donny a mis ce fait en évidence par une expérience très-curieuse. Un tube de verre de diamètre étroit (*fig.* 188), muni de trois boules à l'une de ses extrémités et fermé à la lampe, contient une petite quantité d'eau distillée, qu'on a fait bouillir assez longtemps dans le tube, pour expulser complétement l'air dissous dans l'eau et celui qui serait resté dans l'espace non occupé par le liquide. Le tube ainsi préparé et refroidi plonge, par une de ses extrémités C, dans une dissolution de chlorure de calcium qu'on échauffe. Or, la température du bain peut être portée à 135°, sans qu'il apparaisse dans le liquide la moindre trace de bulles de vapeur. A ce degré seulement, le liquide est projeté en masse dans les boules B, où le choc se trouve amorti par l'augmentation su-

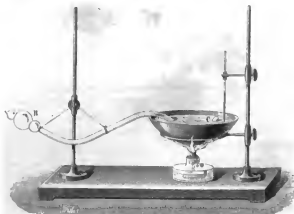


Fig. 188.

bite de la capacité. L'absence de tout gaz dans le tube et dans l'eau est la cause principale du phénomène. On comprend, en effet, que l'air habituellement dissous dans l'eau en favorise l'ébullition, car il se trouve interposé entre les molécules liquides et diminue par suite leur cohésion.

DISTILLATION.

405. La connaissance des phénomènes généraux, qui se rapportent à

l'ébullition des liquides, fait comprendre comment ont pu être résolues deux questions, qui se présentent souvent dans la pratique. 1° Étant donné un liquide qui renferme en dissolution des substances fixes, telles que les matières salines en général, isoler ce liquide à l'état de pureté; 2° étant donnés plusieurs liquides mélangés, mais de volatilités différentes, les séparer l'un de l'autre.

406. **Alambics.** — Le premier problème se présente notamment quand il s'agit, dans les laboratoires, d'obtenir l'eau à un degré de pureté absolue. On se sert dans ce cas d'un appareil nommé *alambic*. Il se compose (*fig.* 189) d'une chaudière ou cucurbite C, dans laquelle est placée l'eau qu'on veut purifier et, en outre, d'un chapiteau K communiquant, par l'intermédiaire du tube T, avec un serpentin en métal entouré d'eau froide. On renouvelle cette eau par un tube vertical muni d'un entonnoir E et plongeant jusqu'au fond du réfrigérant V. De cette manière, l'eau froide arrive par le bas et déplace l'eau la plus chaude, qui se trouve toujours à la partie supérieure et qui s'échappe par le trop plein P. Enfin l'extrémité du serpentin débouche en O dans le vase où l'on veut recueillir l'eau purifiée.

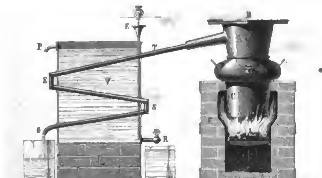


Fig. 189.

Ces détails suffisent pour comprendre le jeu de l'appareil. L'eau de la chaudière portée à l'ébullition fournit de la vapeur qui va se liquéfier dans le serpentin. Les gaz en dissolution dans l'eau se dégagent dès le commencement de l'opération, on s'en débarrasse, en rejetant les premières portions d'eau distillée. De même, on arrête le feu, lorsque les trois quarts environ de l'eau introduite dans la chaudière ont passé à la distillation : on évite ainsi la décomposition de certains sels et des matières organiques, décomposition qui se produit, vers la fin de l'opération, au contact des parois échauffées de la chaudière et dans les points que le liquide ne baigne plus. Ces corps, en se décomposant, fourniraient des produits volatils qui iraient altérer la pureté de l'eau déjà obtenue.

On profite quelquefois de la chaleur perdue par la liquéfaction de la vapeur, en plaçant, au-dessus du chapiteau de l'alambic, un bain de sable B dans lequel peuvent être concentrées différentes liqueurs. L'appareil, que nous avons figuré ici, présente une disposition de ce genre.

407. Quand on n'a pas un alambic à sa disposition, on peut y suppléer par l'emploi d'un appareil de distillation plus simple et surtout moins coûteux. La chaudière de l'alambic est remplacée par une cornue, le serpentin par un long tube de verre ou une allonge qui reçoit à l'une de ses extrémités le col de la cornue et qui aboutit, d'autre part, à un ballon bitubulé : ce dernier représente le récipient destiné à recueillir le liquide distillé. Autour de l'allonge est quelquefois un manchon servant de réfrigérant, dans lequel circule un courant d'eau froide. Enfin, le ballon bitubulé plonge lui-même dans l'eau froide, ou est entouré d'un linge mouillé, afin de retenir et de condenser les dernières portions de vapeur.

408. **Méthode des distillations fractionnées.** — Le problème, qui consiste à séparer des liquides de volatilités différentes, se rencontre fréquemment en chimie. On emploie, pour le résoudre, la méthode des *distillations fractionnées ;* expliquons sur un exemple en quoi elle consiste. — Le vin est un mélange, en proportions diverses, d'eau, d'alcool, d'acides libres, de sels minéraux, de matières colorantes. Il s'y trouve donc, en fait de produits inégalement volatils, de l'eau et de l'alcool. Les autres substances sont à peu près fixes ; il faut en excepter quelques composés, à saveur aromatique, qu'on peut comparer aux éthers ou aux huiles essentielles, mais qui ne s'y rencontrent jamais qu'en quantité très-minime. Une opération industrielle, fréquemment exécutée, a pour but d'obtenir l'alcool à divers degrés de dilution dans l'eau. Dans les laboratoires, on prépare aussi quelquefois l'alcool à l'état de pureté ou l'alcool absolu. Voici quelques détails, sur les méthodes expérimentales suivies dans ces deux cas.

Le vin est chauffé dans un alambic ; son ébullition se manifeste, comme nous l'avons vu (401), à une température notablement inférieure à 100°. Il passe alors à la distillation un liquide formé d'alcool et d'eau, mais dans lequel la proportion d'alcool est déjà beaucoup plus forte que dans le vin employé. Avec les vins les plus alcooliques, qui renferment jusqu'à 18 p. 100 d'alcool, dès qu'on a obtenu, par la distillation, un volume de liquide égal au tiers du volume du vin, l'alcool tout entier a passé de la chaudière dans le récipient placé à l'extrémité du serpentin ; à plus forte raison, le même résultat se produit-il, quand la liqueur est faiblement alcoolique. Qu'on reprenne maintenant le liquide obtenu qui ne représente qu'une fraction du volume primitif et qu'on le distille de nouveau ; les premières portions condensées dans le serpentin seront les plus riches en alcool, et on comprend qu'en les conservant seules, on puisse ainsi accroître de plus en plus, par des opérations semblables aux précédentes, la richesse de la li-

queur. Il est vrai de dire cependant, qu'on n'arriverait jamais par ce procédé à isoler l'alcool anhydre : il existe une affinité telle entre ces deux substances, alcool et eau, qu'il est indispensable, pour les séparer, de recourir à l'emploi d'un corps solide possédant une grande affinité pour ce dernier liquide (la chaux ou le carbonate de potasse), qui, après un contact prolongé et une distillation nouvelle, finit par retenir l'eau complétement.

409. C'est, en suivant une marche analogue à celle que nous venons d'indiquer, qu'on extrayait autrefois l'eau-de-vie du vin. Il fallait deux chauffes successives pour amener la liqueur alcoolique au degré voulu, 50 à 53° de l'alcoomètre centésimal. Depuis plusieurs années, on lui a substitué, avec avantage, la méthode de la *distillation continue* dans laquelle le vin, chauffé, dès son entrée dans l'appareil distillatoire, par la chaleur que dégagent la vapeur d'alcool et la vapeur d'eau en se condensant, abandonne peu à peu, sous forme de vapeur, et en suivant un fort long trajet tout l'alcool qu'il renferme, et parvient enfin dans un dernier récipient, où il constitue la vinasse et ne contient plus que de l'eau et des substances fixes.

410. **Appareil de Gay-Lussac modifié par M. Salleron.** — L'alcoomètre, plongé dans le vin lui-même, fournit une indication dont on ne peut rien conclure ; car la densité du liquide dépend, non-seulement des proportions d'alcool et d'eau, mais encore de la quantité des autres substances dissoutes. Il fallait donc tâcher d'isoler la totalité de l'alcool, pour le ramener ensuite au volume primitif, par l'addition d'une quantité suffisante d'eau distillée. L'immersion de l'alcoomètre dans ce nouveau liquide renseignera alors très-exactement sur la proportion d'alcool contenue dans le vin.

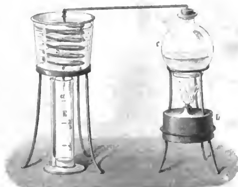


Fig. 190.

Le fait signalé plus haut : l'abandon de tout l'alcool par le vin, quand le tiers de son volume a distillé, a été le point de départ d'un procédé ingénieux imaginé par Gay-Lussac pour estimer la richesse alcoolique du vin. L'appareil construit dans ce but a été perfectionné depuis par M. Salleron, et l'on peut, aujourd'hui, arriver à un dosage rigoureux, en n'employant que quelques centimètres cubes de la liqueur vineuse.

On remplit avec le vin à essayer, l'éprouvette E (*fig.* 190), jusqu'au trait supérieur α. On verse ce liquide dans la petite chaudière C qu'on réunit

ensuite par un tube de caoutchouc au serpentin S; puis en chauffant la chaudière avec la lampe à esprit-de-vin L, on distille, jusqu'à ce ce que le liquide dans l'éprouvette affleure à la division $\frac{1}{3}$: on peut alors être sûr que l'alcool tout entier est parvenu dans ce dernier récipient. Qu'on ajoute, à ce moment, de l'eau distillée jusqu'au trait α, on rendra au liquide son volume primitif; et, comme on n'aura plus affaire qu'à un simple mélange d'alcool et d'eau, l'affleurement de l'alcoomètre plongé dans ce liquide donnera, avec exactitude, l'indication demandée. Un petit thermomètre placé en même temps dans l'éprouvette E, permet d'estimer la température du liquide et par suite d'effectuer la correction de température dont nous avons indiqué la nécessité (126).

411. Marmite de Papin. — En étudiant l'appareil employé par Dulong et Arago, pour la mesure des tensions de la vapeur d'eau au-dessus de 100°, nous avons vu qu'il est possible, quand on opère en vase clos, et qu'on ne refroidit pas la vapeur formée, d'élever la température d'un liquide à un degré quelconque, sans qu'il se produise aucune ébullition; la tension toujours croissante de l'atmosphère saturée qui pèse sur le liquide, est un obstacle permanent à la formation des bulles. Cette propriété a été, depuis longtemps, mise à profit, dans l'appareil nommé *marmite de Papin*. C'est un cylindre de bronze A (*fig.* 191), à parois épaisses qu'on peut clore hermétiquement, à l'aide d'un couvercle de même métal B, maintenu contre l'ouverture de la marmite par une forte vis en fer F. Une soupape à poids, retenue par le levier L, limite, à la volonté de l'opérateur, la force élastique que la vapeur ne doit pas dépasser, et prévient ainsi la rupture du vase. L'eau introduite à l'avance dans le cylindre peut être facilement portée, quand on la chauffe avec un foyer ordinaire, à une température de beaucoup supérieure à 100° et servir ainsi à la cuisson rapide de certains aliments, ou même *à ramollir les os*, comme disait Papin. Si l'on enlève le levier L, la vapeur comprimée s'échappe avec violence par l'ouverture étroite que fermait la soupape; elle forme comme une colonne de fumée de plusieurs mètres de hauteur, et subit un refroidissement tel, par son expansion dans l'atmosphère,

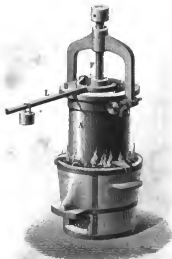


Fig. 191.

qu'on peut impunément placer la main, dans le jet de vapeur, à quelques décimètres de l'orifice.

412. **Expériences de Cagniard-Latour.** — Comme, dans la marmite de Papin, la densité de la vapeur qui s'accumule au-dessus de l'eau, va toujours croissant avec la température, on se demande ce qui arrivera, si après s'être prémuni contre la rupture du vase qui emprisonne la vapeur, l'opérateur continue l'échauffement. M. Cagniard-Latour a le premier résolu cette question, en chauffant fortement divers liquides contenus dans des tubes de verre fermés, à parois très-épaisses : l'eau, l'alcool, l'éther sulfurique. Avant qu'on ne fermât les tubes, l'air en avait été expulsé par l'ébullition prolongée du liquide. Il a été constaté que les liquides placés dans ces conditions pouvaient se réduire totalement en vapeur, dans un espace double ou triple de leur volume primitif. La pression de cette vapeur estimée approximativement, à l'aide d'un petit manomètre à air comprimé qui plongeait dans le liquide échauffé, était de 38 atmosphères pour l'éther, de 120 atmosphères environ pour l'alcool.

M. Drion, qui a répété les expériences de Cagniard-Latour, a reconnu que, vers 190°, l'éther ne présente plus cette surface terminale habituellement très-nette qui sépare le liquide de la vapeur placée au-dessus de lui; il se forme, vers la région qu'occupe cette surface, comme un nuage opaque qui va en grandissant de plus en plus, et finit par envahir la capacité totale du tube en se dissolvant, d'une part dans le liquide, de l'autre dans la vapeur. M. Drion fixe à 190°,5 la température de la conversion totale de l'éther en vapeur, dans un espace à peu près triple de son volume primitif. Mais les valeurs de la pression et de la température n'auraient, dans le cas actuel, une véritable importance, que si l'on déterminait en même temps avec exactitude, les volumes réels occupés successivement par le liquide et par la vapeur.

413. **Caléfaction des liquides.** — Les phénomènes, dits phénomènes de *caléfaction*, offerts par les liquides qu'on projette sur une surface fortement chauffée, paraissent, au premier abord, contredire les lois ordinaires de la vaporisation ; mais ce n'est encore qu'une anomalie apparente. Citons les faits principaux : dans une capsule d'argent polie, à parois épaisses, fortement chauffée par une lampe à alcool à double courant, on instille une petite quantité d'eau à l'aide d'une pipette. Le liquide, au lieu de s'étendre à la surface de la capsule et de se volatiliser promptement, comme on s'y attendrait tout d'abord, se réunit en une petite masse de forme sphéroïdale qui se réduit peu à peu en vapeur, sans qu'il y ait une ébullition sensible. Laisse-t-on refroidir la capsule qui contient le sphéroïde; il arrive bientôt un moment où l'eau s'étend, tout d'un coup, à la surface du métal, et se réduit presque subitement en vapeur, avec une sorte d'explosion. Remplace-t-on la capsule par un disque à peu près plan

de même substance ; et, ajoute-t-on du noir de fumée pour rendre opaque le globule liquide ; si l'œil est placé de telle sorte que le rayon visuel rase la surface métallique, on peut apercevoir un point lumineux, qui eût été invisible, si le contact du liquide avec la capsule eût été permanent. Enfin, la boule d'un thermomètre étant plongée dans le globule liquide, on constate que la température de l'eau est toujours inférieure à celle de son ébullition sous la pression actuelle. Des résultats tout à fait semblables sont obtenus, quand on substitue, à l'eau, un liquide volatil quelconque : l'alcool, l'éther, etc.

414. **Expériences de M. Boutigny.** — M. Boutigny a étudié ces phénomènes et diversifié d'une manière très-ingénieuse les expériences qui s'y rapportent. C'est lui qui a désigné sous le nom de *caléfaction* l'opération que nous venons de décrire. On lui doit la curieuse expérience de la congélation de l'eau dans un creuset de platine chauffé au rouge blanc. Il suffit de verser, dans le creuset porté à cette haute température, une petite quantité d'acide sulfureux liquide qui bout à — 11°, puis de faire arriver un peu d'eau, au contact de cet acide sulfureux, pour voir un glaçon se former au fond du creuset incandescent.

415. **Les faits précédents rentrent dans les lois ordinaires.** — Tels sont les faits les plus saillants. Peut-on les expliquer en partant des lois déjà établies ? Cela ne nous semble pas douteux. — Le liquide qui mouille un métal à la température ordinaire, ne le mouille plus, quand ce métal possède une température suffisamment élevée. Un cylindre de platine incandescent, plongé dans l'eau, établit autour de lui une dépression visible du liquide ; cette dépression est tout à fait analogue à celle qu'on obtient par l'immersion d'un cylindre de verre dans le mercure, mais elle est beaucoup plus prononcée que cette dernière. La seule différence, c'est qu'entre le verre et le mercure il ne reste qu'une couche très-mince d'air, tandis qu'entre le platine incandescent et l'eau il se produit une gaîne de vapeur, qui se renouvelle sans cesse et maintient par sa force expansive, un écart sensible entre le solide et le liquide. Il suit de là, que l'eau devra s'arrondir en sphéroïde dans une capsule de platine rouge de feu, et demeurer, comme suspendue au-dessus de la capsule, de même que le mercure se dispose en globule à la surface d'une lame de verre et en demeure séparé par une mince couche d'air. Cette suspension du liquide caléfié est donc un phénomène de capillarité compliqué d'un dégagement permanent de vapeur entre le liquide et le métal. Or, puisque le contact n'existe pas, le liquide reçoit la chaleur uniquement par voie de rayonnement ; cette chaleur est employée à volatiliser la couche superficielle qui l'absorbe la première, et il ne saurait y avoir ébullition, puisque la vapeur peut librement se dégager dans l'atmosphère, aux points mêmes où elle prend naissance. Si l'on voit quelquefois de grosses bulles traverser le

sphéroïde caléfié, cela tient à la présence d'aspérités, à la surface de la capsule. Ces portions saillantes du métal creusent la masse liquide en dessous; et la vapeur emprisonnée dans une sorte de cavité ne peut alors s'échapper qu'en traversant le liquide sous forme de bulles. D'ailleurs on reproduit ce phénomène, à volonté, en rendant un peu convexe le fond de la capsule.

416. La vapeur, au point où elle se forme, possède une tension qui ne peut être supérieure à celle de l'atmosphère environnante; donc la température du liquide caléfié ne peut être supérieure à celle de son ébullition. L'acide sulfureux ne pouvant avoir une température supérieure à —11°, doit-on s'étonner que l'eau mise en contact avec un corps dont la température est inférieure à 0°, se congèle à la façon ordinaire? Si on place un vase plein d'eau dans un four chauffé à 1000°, elle bouillira avec rapidité, mais sa température ne dépassera pas 100°; si, dans cette eau, on verse du plomb fondu, trouvera-t-on extraordinaire que ce plomb devienne solide, quand on sait que la température de solidification du métal est 320°? Pourtant, la congélation du plomb dans un four chauffé à 1000°, est un phénomène identique à la formation de la glace dans un creuset de platine incandescent.

ÉVAPORATION

417. **Phénomène de l'évaporation.** — Lorsqu'un liquide abandonné au contact de l'air se trouve à une température inférieure à celle de l'ébullition, la vapeur qu'il émet n'a pas une tension suffisante pour refouler l'air environnant, elle se dégage peu à peu de la surface libre du liquide, et s'insinue lentement entre les molécules d'air placées dans le voisinage. C'est le phénomène de l'évaporation. L'équilibre ne sera possible, et la production de vapeur ne cessera, qu'autant que l'atmosphère placée au-dessus du liquide sera saturée de sa vapeur. Si cette atmosphère est limitée, la saturation sera possible et l'évaporation aura un terme; si elle est illimitée, ou que le gaz se renouvelle sans cesse à la surface libre du liquide, la formation des vapeurs sera incessante.

418. **Circonstances qui influent sur la rapidité de l'évaporation.** — On voit de suite, sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans beaucoup de détails, quelles sont les causes qui font varier la rapidité de l'évaporation. S'agit-il de l'eau exposée à l'air? La diminution de la pression extérieure, l'élévation de la température du liquide, l'absence de vapeur d'eau dans l'air, l'agitation de l'atmosphère, l'augmentation d'étendue de la surface libre du liquide sont autant de causes qui accélèrent l'évaporation et qu'il faut tâcher de réaliser, toutes les fois qu'on veut se débarrasser promptement d'un excès d'eau; par exemple, quand il s'agit de hâter la dessiccation du linge et des différents tissus.

419. **Production du froid par l'évaporation.** — Que la vapeur prenne naissance avec lenteur ou rapidité, elle exige, dans tous les cas, qu'une certaine quantité de chaleur lui soit fournie ; c'est la condition essentielle du changement d'état. Si aucune source étrangère n'intervient, tout liquide, en s'évaporant, se refroidit lui-même et prend de la chaleur aux corps voisins. C'est ainsi qu'on peut faire congeler du mercure, en répandant sur la boule d'un thermomètre, recouverte de coton cardé, de l'acide sulfureux liquide dont on accélère l'évaporation, soit en faisant passer un courant d'air rapide, soit en raréfiant l'air environnant par l'emploi de la machine pneumatique. C'est ainsi qu'un liquide volatil (éther, alcool) versé sur la main détermine une sensation de froid. C'est aussi, par la même cause, que les vases de terre poreuse nommés alcarazas, servent pendant les chaleurs de l'été à entretenir fraiche l'eau qu'ils contiennent. Le liquide, en suintant à travers les parois, vient s'évaporer à la surface extérieure du vase et refroidit par suite, d'une manière continue, l'eau qui reste à l'intérieur.

SECTION IV

Liquéfaction des gaz.

420. **Idées théoriques concernant la liquéfaction des gaz.** — Quand une vapeur n'est plus en contact avec son liquide générateur, et qu'on élève sa température ou qu'on diminue sa pression, pour la placer dans des conditions très-éloignées de celles qui conviennent à sa saturation, elle devient un fluide élastique tout à fait comparable aux gaz ordinaires. Cette notion très-simple, fournie par l'expérience, sur l'identité du gaz et des vapeurs non saturées permet de prévoir quels seront les moyens propres à liquéfier les gaz. Il faudra évidemment les comprimer et les refroidir, afin de les ramener à l'état de vapeurs saturées ; parvenus à ce point, la moindre diminution de volume ou de température provoquera leur conversion en liquides. Davy est le premier qui ait réussi, dans ce genre de tentatives, en liquéfiant le chlore. Après lui, Faraday est parvenu à convertir en liquides un grand nombre de gaz, qu'on avait considérés jusqu'alors comme permanents.

Trois méthodes principales ont été employées par les physiciens et par les chimistes pour arriver à la liquéfaction des gaz : 1° Un simple abaissement de température ; 2° la pression qu'un gaz exerce sur lui-même, lorsqu'il s'accumule, en grande quantité, dans un vase de capacité restreinte et à parois peu extensibles ; 3° une pression mécanique étrangère exercée sur le gaz. Dans les deux dernières méthodes, la pression est d'ailleurs le plus souvent combinée, avec un abaissement convenable de température.

421. **Première méthode. — Refroidissement des gaz.** — Par ce premier procédé, on convertit facilement en liquides, l'acide sulfureux, l'acide chlorhydrique et, en général, tous les gaz dont le point de liquéfaction est peu éloigné de zéro. L'appareil est disposé pour l'acide sulfureux comme l'indique la figure 192. Le gaz qui se produit dans le ballon B, est conduit par un tube abducteur dans un flacon F, où il se dessèche en traversant une couche d'acide sulfurique monohydraté; de là, il parvient dans un tube en U, le tube M, entouré d'un mélange réfrigérant (glace pilée et sel marin) pour s'écouler, à mesure qu'il se liquéfie, dans un flacon F' plongé lui-même dans un mélange réfrigérant de même espèce. L'acide sulfureux liquide entrant en ébullition à — 11°, il est indispensable, pour le conserver, de clore hermétiquement le flacon qui le contient ou mieux de le placer dans un matras, dont le col effilé est scellé à la lampe.

422. **Expériences de MM. Loir et Drion.** — Il y a quelques mois, MM. Loir et Drion ont déterminé la liquéfaction de l'acide carbonique, sous la pression de l'atmosphère, en abaissant la température du gaz à — 90°. Ils sont parvenus à le solidifier dans ces conditions à l'aide d'une pression de 2 ou 3 atmosphères. Le tube de verre, dans lequel arrivait l'acide carbonique, était refroidi, par son immersion dans l'ammoniaque liquéfiée, dont on activait l'évaporation, en se servant de la machine pneumatique. L'acide carbonique solide, qu'on n'avait su préparer, jusqu'à ce jour, que sous la forme de masses spongieuses formées de flocons agglomérés, s'est présenté cette fois à l'état de cristaux incolores, transparents comme la glace, d'apparence cubique et offrant des arêtes de 3 à 4 millimètres.

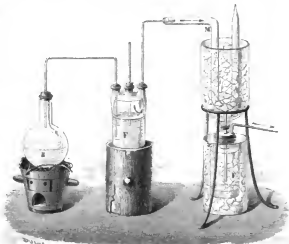


Fig. 192.

423. **Deuxième méthode. — Compression du gaz par lui-même. — Liquéfaction du chlore.** — Par une réaction chimique ou par une éléva-

tion de température, rendez libre un gaz qui était primitivement condensé dans un composé solide ou liquide; faites que le gaz, en se dégageant, ne puisse se loger que dans un espace très-étroit, un tube de verre à parois très-résistantes; sa force élastique croîtra d'une manière continue, et il finira par se liquéfier. — Citons comme exemple la liquéfaction du chlore. — La première idée de la méthode appartient, comme nous le disions plus haut, à Davy, mais c'est Faraday qui l'a mise en œuvre. On introduit des cristaux d'hydrate de chlore (combinaison de chlore et d'eau renfermant 28 parties de chlore et 72 d'eau) dans un tube de verre, à parois épaisses ayant la forme ci-contre (*fig.* 193); on ferme ensuite le tube à la lampe, et on le chauffe par l'extrémité C, qui contient les cristaux; ceux-ci, ne pouvant exister qu'à une température peu supérieure à 0°, se décomposent, et le chlore gazeux en se dégageant dans l'espace E, se comprime lui-même et va former une couche liquide d'un jaune verdâtre surmontée d'une petite quantité d'eau. En refroidissant l'autre branche du tube, la vapeur du chlore va s'y liquéfier peu à peu, jusqu'à ce que tout le liquide ait disparu dans la première branche. Cela résulte du principe de Watt, que nous avons établi plus haut.

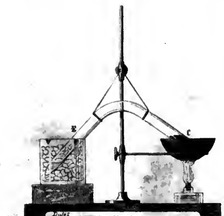


Fig. 193.

424. Liquéfaction de l'acide carbonique. — Thilorier a obtenu l'acide carbonique liquide, en plaçant, dans un cylindre de fonte à parois très-épaisses (*fig.* 194) qu'il fermait ensuite hermétiquement, d'une part du bicarbonate de soude, de l'autre de l'acide sulfurique étendu d'eau. L'acide sulfurique était contenu dans un tube de cuivre T placé verticalement dans l'axe du cylindre; il se trouvait ainsi momentanément séparé de la substance saline. On imprimait au cylindre de légères oscillations, autour de son axe de rotation AA', pour faire arriver peu à peu l'acide au contact du sel; la réaction chimique s'établissait entre les deux corps : il y avait du sulfate de soude qui prenait naissance, et l'acide carbonique se dégageait dans la capacité supérieure du cylindre de fonte. A partir de ce moment, le gaz se comprimait de plus en plus, et comme la force élastique n'empêchait pas l'action chimique de se continuer, la liquéfaction devenait nécessaire. Elle avait lieu à la température de 0° lorsque la pression du gaz devenait égale à 36 atmosphères.

Thilorier séparait ensuite le gaz liquéfié du sulfate de soude qui s'était formé, en faisant communiquer le cylindre générateur du gaz par le tube S, avec un récipient refroidi, de forme à peu près pareille. La distillation du liquide s'opérait spontanément du cylindre plus chaud vers le récipient, qui bientôt contenait la plus grande partie de l'acide carbonique liquide. Enfin, la solidification de la même substance a été produite par l'introduction, dans l'intérieur d'une boite cylindrique, d'un jet de l'acide carbonique liquide, qui remplit le récipient. Le jet, rencontrant la paroi intérieure de la boite dans une direction à peu près tangentielle, se met à tournoyer d'une manière rapide. La volatilisation et par suite le refroidissement du liquide deviennent alors tels que la boîte se remplit de flocons neigeux qui s'agglomèrent : c'est l'acide carbonique qui s'est solidifié. Il n'y a plus qu'à ouvrir la boite pour en extraire la substance, qui se présente alors sous la forme d'un corps solide blanc, spongieux, très-mauvais conducteur de la chaleur, et ne se réduisant plus que lentement en vapeur, quand il est abandonné à l'air libre.

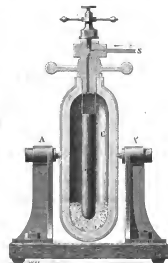


Fig. 194.

425. **Production des froids les plus intenses que l'on connaisse.** — L'acide carbonique solide préparé par la méthode de Thilorier produit, par son seul contact, un abaissement de température considérable ; mais l'action frigorifique est limitée parce que la masse spongieuse ne conduit pas la chaleur. Cette action frigorifique devient très-intense lorsqu'on mélange l'acide neigeux avec l'éther sulfurique ; alors la conductibilité augmente notablement, et l'on peut obtenir un abaissement de température de — 92°. On dépasse — 100°, lorsque le mélange est placé dans le vide de la machine pneumatique. C'est en produisant ainsi des abaissements de température considérables et en recourant, en même temps, à l'emploi des pompes foulantes, que Faraday est parvenu, à la suite de ses premiers essais, qui ne portaient que sur un petit nombre de substances gazeuses, à liquéfier tous les gaz à l'exception de six : l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, l'oxyde de carbone, le bioxyde d'azote et le gaz des marais.

426. **Troisième méthode. — Compression d'un gaz par des actions mécaniques étrangères. — Procédé de M. Berthelot.** — M. Berthelot a indiqué un moyen très-simple, pour soumettre un gaz à une pression

énorme et pour arriver ainsi à le liquéfier. Il renferme le gaz dans la partie effilée d'un tube de verre à parois épaisses, dont la partie large constitue un récipient cylindrique rempli de mercure. Après que la pointe effilée a été fermée, l'instrument ressemble à un thermomètre dans lequel l'espace, destiné à recevoir le mercure au moment de sa dilatation, est actuellement occupé par la masse gazeuse. On comprend alors, qu'en élevant la température du récipient, tandis que le gaz est entretenu à 0°, on puisse, par la dilatation du liquide, rendre le volume du gaz aussi petit qu'on voudra et en accroître ainsi considérablement la force élastique. Si l'on donne au tube qui contient le gaz une même longueur qu'au récipient destiné au mercure et si l'on prend le diamètre de ce dernier trente fois plus grand que celui du tube, la pression devient égale à 200 atmosphères pour une élévation de température d'environ 7°.

(Voir pour le calcul, le chapitre des problèmes à la fin du livre, où la question se trouve traitée.)

427. **Liquéfaction du protoxyde d'azote.** — Natterer employait, pour liquéfier le protoxyde d'azote, une pompe foulante à l'aide de laquelle il comprimait le gaz dans la culasse d'un fusil à vent. Son procédé a été perfectionné par M. Dumas. Un réservoir de fer forgé R (*fig.* 195), à parois très-résistantes, porte à son ouverture inférieure une soupape conique Z s'ouvrant de bas en haut. Son ouverture supérieure est fermée par une vis à pointe conique qui, au moment où elle est soulevée d'une petite quantité, permet au liquide de s'échapper par le tube latéral *t*. Un corps de pompe C se visse à la partie inférieure du récipient, et le piston *p* qui le parcourt est mis en mouvement par une manivelle adaptée à un arbre coudé muni d'un volant. Le protoxyde d'azote arrive du gazomètre dans le récipient par le tube *t'*. Dans ces conditions, le mouvement de va-et-vient du piston aura pour effet de condenser, dans le vase B, des masses considérables de protoxyde d'azote ; au bout de peu de temps, la liquéfaction du gaz devra nécessairement se produire. On facilite la conversion du gaz en liquide en entourant le récipient d'un mélange réfrigérant M. En outre, pour empêcher la pompe de s'échauffer, on fait circuler un courant d'eau froide dans le manchon M' qui entoure le corps de pompe. Le protoxyde d'azote se liquéfie sous la pression de 30 atmosphères, quand on maintient sa température à 0°. Il se solidifie vers — 100°.

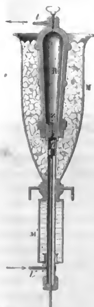


Fig. 195.

HYGROMÉTRIE

428. **But des hygromètres.** — L'atmosphère renferme toujours de la vapeur aqueuse. Il suffit d'abandonner, au contact de l'air, un sel déliquescent quelconque, le chlorure de calcium, le carbonate de potasse, pour en avoir une preuve évidente. Par l'augmentation de poids de la substance, et sa liquéfaction ultérieure, on est averti de la présence constante d'une certaine dose d'humidité dans l'atmosphère. La proportion de vapeur d'eau dans l'air est d'ailleurs très-variable dans le même lieu ; le plus souvent elle est insuffisante pour produire la saturation ; elle dépend de la température, de la direction du vent, etc. On nomme hygromètres les instruments, qui permettent de déterminer le rapport qui existe entre la force élastique actuelle de la vapeur d'eau dans l'air et la force élastique maxima qu'aurait cette vapeur, si l'air en était saturé à la même température. C'est ce rapport qu'on a nommé *état hygrométrique de l'air* ou *fraction de saturation*. La connaissance de ce rapport e et de la température t permet de calculer immédiatement, la force élastique actuelle f de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Il suffira, en effet, de chercher dans les tables (383) la tension maxima de la vapeur d'eau F à la température t ; et le produit Fe représentera la valeur de f.

429. De même, quand on aura f, il sera facile de calculer quel est le poids p d'humidité contenu dans un mètre cube d'air. La question se trouvera ramenée dans ce cas à déterminer le poids d'un mètre cube de vapeur dont la force élastique est f, la température t et la densité 0,622. La solution de cette question a été donnée (392) où l'on a trouvé pour le poids y d'un litre de vapeur dans les conditions précédentes :

$$y = 1^{gr},293\ \frac{f}{760} \times \frac{0,622}{1+\alpha t}.$$

Le poids p d'un mètre cube de vapeur sera donc

$$p = 1^{kil},293 \times \frac{f}{760} \times \frac{0,622}{1+\alpha t} = \frac{1}{945}\,\frac{f}{(1+\alpha t)},$$

f devra être exprimé en millimètres.

430. **Trois méthodes hygrométriques.** — En somme, trois méthodes générales se présentent pour résoudre la question fondamentale de l'hygromètre : Ou bien obtenir p directement : la *méthode chimique* donne cette première solution. Ou bien arriver à la détermination immédiate de f : ce but sera atteint par l'emploi des hygromètres de condensation. Ou bien, enfin déduire e des indications de l'instrument : ce sont les hygromètres

d'absorption et en particulier l'hygromètre à cheveu de de Saussure, qui permettront d'obtenir cette troisième solution.

431. Hygromètre à cheveu de de Saussure. — En général, les matières filamenteuses, qui dérivent de la peau chez les animaux, telles que les cheveux, les plumes, etc., possèdent la propriété de s'allonger, en absorbant une partie de l'humidité de l'atmosphère. Le cheveu, en particulier, peu sensible aux changements de température, éprouve des variations très-notables dans sa longueur, quand l'état hygrométrique de l'air, qui l'entoure, vient à changer. Tel est le principe utilisé par de Saussure, dans la construction de l'hygromètre qui porte son nom.

432. Construction de l'hygromètre. — Le cheveu doit d'abord être débarrassé de la matière grasse, qui l'imprègne habituellement et qui s'opposerait, en partie, à l'absorption de la vapeur d'eau. Saussure employait, pour ce dégraissage préalable, une dissolution de carbonate de soude. Mais, les liqueurs alcalines pouvant altérer une substance organique aussi délicate, on préfère aujourd'hui se servir d'éther sulfurique, dans lequel le cheveu demeure immergé pendant plusieurs heures. Cette opération faite, le cheveu est attaché par une de ses extrémités à une pince P (*fig.* 196); puis, il s'enroule sur la gorge d'une poulie P' et supporte à son autre extrémité un petit contre-poids B, de $0^{gr}.2$ environ, destiné à le tendre. A l'axe de la poulie, est fixée une aiguille qui se meut sur un cadran divisé C. On voit que, grâce à cette disposition, la pointe de l'aiguille marche vers la partie supérieure du cadran quand le cheveu s'allonge; elle marche en sens inverse, s'il vient à se raccourcir. A ces détails ajoutons, que la poulie, avec l'aiguille qu'elle porte, doit être installée de manière à se maintenir en équilibre indifférent; ce que l'on réalise en faisant coïncider le centre de gravité du système avec l'axe de suspension. Enfin, un thermomètre T est adapté à la même monture métallique que l'hygromètre.



Fig. 196.

433. Graduation. — L'hygromètre est gradué, comme un thermomètre à mercure, par le choix de deux points fixes : celui d'humidité extrême ou de saturation de l'air, celui de sécheresse absolue. Quand on veut obtenir le premier, l'instrument est placé sous une cloche de verre, dont les parois intérieures ont été mouillées avec une petite quantité d'eau. L'air contenu dans la cloche se sature, le cheveu s'allonge et au point où l'aiguille s'arrête définitivement dans cette atmosphère humide, on marque 100. Le point 0 est obtenu, d'une manière analogue, par l'immersion prolongée de

l'hygromètre, dans une atmosphère confinée qu'on a complétement desséchée avec la chaux vive. Comme la détermination de ce dernier point pourrait altérer la texture du cheveu, parce qu'une portion de l'eau de constitution lui serait enlevée, il est bon de laisser séjourner ensuite, pendant longtemps, l'instrument dans une atmosphère très-humide, où la substance organique reprenne, à peu près, son état primitif. L'intervalle compris sur le cadran, entre les deux points fixes, est ensuite divisé en 100 parties égales, qui sont les degrés de l'hygromètre.

434. **Table des états hygrométriques.** — L'hygromètre ainsi gradué marquera toujours 0° dans un air sec, dont l'état hygrométrique est 0, et il marquera 100°, dans un air saturé qui correspond à un état hygrométrique 1. Mais ses indications seront-elles 25°, 50°, 75° dans des atmosphères dont les états hygrométriques auront pour expression 0,25, 0,50, 0,75? En un mot les allongements du cheveu sont-ils proportionnels aux fractions de saturation? C'est à l'expérience à pronoucer sur ce point. Elle nous apprend que, cette proportionnalité est loin d'exister; elle dit aussi, qu'à chaque degré de l'hygromètre correspond sensiblement un même état hygrométrique, dans les limites des températures ordinaires. Avec l'un des instruments gradués par Gay-Lussac, le degré 25 se rapportait à une fraction de saturation égale à 0,120; le degré 50 à 0,277, le degré 75 à 0,538. Il est donc nécessaire de construire des tables, qui permettent de déduire immédiatement de l'indication de l'hygromètre l'état hygrométrique correspondant.

435. **Construction des tables. — Méthode de Gay-Lussac.** — Gay-Lussac, pour construire la table des états hygrométriques, s'est fondé sur le principe expérimental suivant : la vapeur d'eau émise par une dissolution saline, possède toujours une force élastique finale inférieure à celle que donnerait l'eau pure placée dans les mêmes conditions; cette force élastique est même d'autant plus faible, que la dissolution renferme une plus forte proportion de sel. Partant de là, Gay-Lussac a employé une série de dissolutions salines à divers degrés de concentration. Il mesurait d'abord la tension maxima f de la vapeur fournie par l'une d'elles; dans ce but il faisait parvenir une petite quantité de la dissolution dans la chambre d'un baromètre à vapeur semblable à celui de Dalton (373); et, par la distance des niveaux du mercure dans le baromètre à vapeur et dans le baromètre ordinaire, il avait la mesure de la force cherchée f. D'autre part, il notait le degré n, indiqué par l'hygromètre à cheveu suspendu dans une cloche au-dessus de la même dissolution. La connaissance de la température lui permettait d'obtenir la tension maxima F de la vapeur d'eau pure; il avait donc le rapport $\frac{f}{F}$ ou l'état hygrométrique correspondant au degré n. En répétant la même expérience, avec des dissolutions de com-

positions diverses, il a parcouru les différentes régions de l'échelle hygrométrique; en s'aidant ensuite, soit d'une construction graphique, soit d'une formule empirique, dont les constantes étaient calculées à l'aide des expériences déjà faites, il a pu estimer la valeur de $\frac{f}{F}$ se rapportant à chaque degré de l'hygromètre. Voici quelques-uns des nombres obtenus à la température de 10°.

DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE.	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES.	DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE.	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES.
0°	0	55°	0,318
5	0,022	60	0,363
10	0,046	65	0,414
15	0,070	70	0,472
20	0,094	75	0,538
25	0,120	80	0,612
30	0,148	85	0,696
35	0,177	90	0,791
40	0,208	95	0,891
45	0,241	100	1
50	0,277		

436. **Dissolutions employées par M. Regnault.** — M. Regnault s'est servi, dans le même but, d'acide sulfurique à différents degrés de concentration; il a publié des tables, qui donnent, pour chaque solution acide de composition bien définie, la force élastique de la vapeur émise aux températures comprises entre 5° et 35° centigrades. Avec ces données, chaque observateur peut, en se servant de dissolutions identiques à celles de M. Regnault, construire lui-même la table de l'hygromètre à cheveu qu'il emploie, sans être obligé de faire les déterminations directes des forces élastiques des vapeurs. Il peut, en outre, omettre de fixer le 0 ou le point de sécheresse extrême qui entraîne, comme nous savons, de graves altérations du cheveu. A cet effet, après avoir tracé sur son cadran une graduation arbitraire, il déterminera, à l'aide des solutions, dont la composition est indiquée par M. Regnault, les états hygrométriques correspondant aux divisions tracées sur l'échelle de son instrument.

437. **Résultats généraux. — Comparabilité des hygromètres.** — Gay-Lussac avait obtenu les éléments de la table hygrométrique, en opérant à la température de 10°. Melloni et M. Regnault ont construit aussi des tables du même genre, en se plaçant à des températures plus élevées; quoique leurs résultats diffèrent un peu de ceux de Gay-Lussac, on peut admettre cependant que la correspondance entre les degrés de l'hygromètre et les fractions de saturation est constante, quand on se

tient dans les limites des températures habituelles de l'atmosphère.

438. Il ressort aussi de l'étude attentive des hygromètres à cheveu faite par M. Regnault, que des instruments, construits avec des cheveux d'origine diverse, ne sont jamais absolument comparables, quoiqu'ils aient été gradués de la même manière. Placés en même temps dans la même atmosphère, ils donnent des indications différentes : cependant les différences ne sont pas très-grandes. En outre, quoique le cheveu soit, parmi les substances organiques, une de celles qui se maintiennent le plus longtemps sans altération, cependant il éprouve, à la longue, des modifications telles que, replacé dans les mêmes conditions d'humidité, il ne reprend pas exactement la même longueur ; en un mot, l'instrument ne demeure pas absolument comparable à lui-même. Concluons de là que l'hygromètre à cheveu, dont l'emploi est facile et commode, n'offre d'exactitude que si chaque opérateur gradue lui-même son instrument et que s'il vérifie de temps en temps la table de correspondance qui s'y rapporte.

439. **Hygromètre de condensation.** — L'air renferme-t-il une quantité de vapeur aqueuse insuffisante pour le saturer à la température, qu'il possède actuellement ? Si l'on vient à refroidir lentement une portion de cet air, tout en laissant constante la force élastique de la vapeur dissoute, on comprend qu'il doive arriver un moment, où la température sera assez basse, pour que la tension de la vapeur soit précisément la tension maxima correspondante à cette nouvelle température ; alors, la couche d'air refroidie sera saturée, et le moindre abaissement ultérieur de la température provoquera une condensation partielle de la vapeur. En notant l'indication d'un thermomètre, plongé dans la couche, au moment où la vapeur commence à se condenser, et en se reportant aux tables des forces élastiques maxima de la vapeur d'eau, on aura la valeur de f. Tel est le principe théorique des hygromètres de condensation.

Dans la pratique, c'est toujours une surface métallique bien polie qu'on refroidit d'une manière progressive, au contact de l'air ambiant. La surface reste d'abord brillante, puis, quand la température est descendue à un degré convenable, elle se voile subitement, et indique à l'opérateur le moment précis, où le dépôt de rosée commence à s'effectuer. Il n'y a plus alors qu'à inscrire la température de la lame de métal sur laquelle la vapeur s'est condensée.

440. Reste à montrer que, dans les conditions que nous venons de préciser, la vapeur d'eau contenue dans la couche d'air, qui se refroidit, conserve une force élastique f invariable. En effet, dans cette couche dont la température s'abaisse, la pression totale H ne saurait changer, à cause de la communication libre avec le reste de l'atmosphère ; car il faut toujours que la réaction qu'elle exerce fasse équilibre à la pression qu'elle subit. D'autre part, cette couche est formée d'air sec et de va-

peur non saturée se comportant comme un gaz; l'un de ces fluides, la vapeur par exemple, ne saurait éprouver la moindre variation dans sa force élastique, sans qu'une variation dans le même sens se produisît, pour le même motif, dans l'air sec, et alors la pression totale H serait modifiée; ce que nous avons dit être impossible. Chacun des deux termes de cette somme H conservera donc la même valeur, malgré l'abaissement de température, et en particulier la force élastique *f* de la vapeur demeurera constante, jusqu'au moment de la condensation.

441. Hygromètre de Daniell. — Dans l'instrument imaginé par Daniell, c'est une boule de verre dorée B (*fig.* 197) qui est refroidie par l'évaporation de l'éther placé dans son intérieur. La température de la boule qui est la même que celle de l'éther est accusée par un petit thermomètre *t* plongé dans le liquide. La boule B communique, par l'intermédiaire d'un tube de verre deux fois recourbé, avec une seconde boule B′ recouverte à l'extérieur d'une gaze fine. Avant de fermer à la lampe ce petit appareil, on a eu soin d'en expulser l'air, en faisant bouillir l'éther qui y était contenu. On voit de suite qu'en versant quelques gouttes d'éther sur la surface de B′, cette boule se refroidit, la vapeur qui est contenue dans son intérieur s'y condense, et le liquide volatil distille de B vers B′. La surface de B se refroidit donc d'une manière progressive, et l'observateur peut noter l'indication du thermomètre plongé dans la boule, au moment où cette surface brillante commence à se ternir. Comme le dépôt de rosée se reconnait toujours un peu trop tard, on doit, cette première observation faite, ne plus verser d'éther sur B′, laisser la boule B se réchauffer d'elle-même et noter la nouvelle température au moment où la rosée disparait complétement. On prend alors la moyenne des deux indications. Pour plus d'exactitude, on doit recommencer plusieurs fois la même expérience, et prendre une moyenne des déterminations successives.

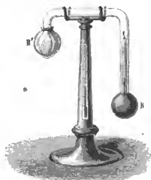


Fig. 197.

442. L'hygromètre de Daniell laisse beaucoup à désirer, au point de vue de l'exactitude des résultats qu'il fournit. 1° C'est surtout la couche superficielle d'éther, qui se refroidit en B, par le fait de la volatilisation, et qui provoque le dépôt de rosée dans une zone correspondante de la boule de verre; tandis que le réservoir du thermomètre plongé dans la masse liquide sous-jacente doit, par suite, accuser une température trop haute. 2° L'éther plus ou moins aqueux qu'on verse sur la boule B′ altère l'état

hygrométrique de l'air dans le voisinage de B. 3° La présence nécessaire de l'opérateur à une petite distance de l'instrument amène une variation du même genre.

443. **Hygromètre de M. Regnault.** — Ces trois causes d'erreur se trouvent complétement éliminées, quand on suit la méthode indiquée par M. Regnault. Dans un dé d'argent D (*fig.* 198) à parois très-minces, et par-

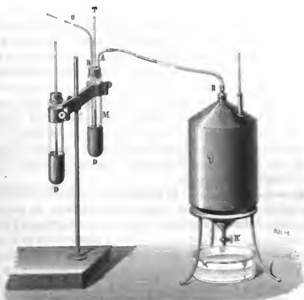


Fig. 198.

faitement poli à l'extérieur, est mastiqué un tube de verre M, qui est fermé, à sa partie supérieure, par un bouchon percé de trois trous. Au trou central est fixée la tige d'un thermomètre T; dans l'un des trous latéraux passe le tube B, pénétrant jusqu'au fond du dé d'argent et s'ouvrant d'autre part en O dans l'atmosphère. Enfin, dans le troisième orifice est adapté le tube A, communiquant par un long conduit en caoutchouc avec la tubulure supérieure R d'un gazomètre V plein d'eau et placé à une grande distance de l'hygromètre; ce tube A ne pénètre que d'une petite quantité dans le large tube M. Après avoir rempli d'éther le dé d'argent, l'opérateur se place à côté du gazomètre, l'œil derrière une lunette, qui lui permet de suivre la marche de la colonne mercurielle dans le thermomètre T et de constater le moment où la surface métallique du dé commence à se ternir. Il ouvre alors le robinet R', l'eau s'écoule; l'air exté-

rieur aspiré par O traverse, par bulles nombreuses, l'éther contenu dans le dé, et arrive chargé de la vapeur de ce dernier liquide dans la partie supérieure du gazomètre. En même temps, l'éther se refroidit également dans toute sa masse, qui se trouve agitée sans interruption par le courant gazeux. Bientôt, un voile de vapeur recouvre la surface métallique dans toute son étendue, et c'est à l'instant précis où il apparaît que la température t du thermomètre T est relevée. On ferme R′ et on attend que le réchauffement du dé fasse disparaître le voile qui le recouvrait ; on note la nouvelle indication t' de T. Il est évident que la température cherchée est comprise entre t et t'. On resserre ces limites de plus en plus, en réglant par tâtonnement l'écoulement de l'eau dans le gazomètre, de manière à ce que le phénomène apparaisse et disparaisse successivement pour une différence très-petite dans la température ; la moyenne des indications du thermomètre dans les deux cas d'apparition et de disparition de la rosée, donne alors, avec une grande approximation, la température cherchée. Un second appareil D, identique au premier, et placé à côté de lui, mais dans lequel l'air ne circule pas, permet à l'opérateur d'apprécier facilement, par comparaison, le moment où la vapeur d'eau atmosphérique commence à se condenser.

444. **Méthode chimique.** — Le principe de la méthode est fort simple : l'air atmosphérique circule, avec lenteur, dans une série de tubes en U, contenant une substance desséchante (la pierre ponce imprégnée d'acide sulfurique concentré), et se débarrasse de toute la vapeur d'eau qu'il contient. Les tubes sont pesés avant et après le passage de l'air ; l'augmentation de leur poids représente le poids p de vapeur condensée. C'est un aspirateur semblable à celui de l'hygromètre de M. Regnault (*fig.* 198) qui sert à produire la circulation du gaz dans les tubes en U ; il se remplit d'air à mesure que l'eau s'écoule ; cet air se sature de vapeur d'eau après y avoir pénétré, son volume total est alors représenté par la capacité même de l'aspirateur V, que l'on a mesurée à l'avance et une fois pour toutes. Comme il est, en outre, très-important d'avoir la vraie température de l'air, on place un thermomètre très-sensible dans le premier tube par lequel pénètre tout d'abord l'air extérieur ; un second thermomètre placé dans une tubulure latérale de l'aspirateur, donne la température t de l'air saturé qui le remplit. La connaissance de p, de V, et de t, et par suite de la tension maxima F de la vapeur d'eau correspondante à t, enfin, la connaissance de la hauteur barométrique H au moment de l'expérience, nous permettent de calculer la force élastique f de la vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère.

En effet, l'air saturé qui remplit le volume V du gazomètre possède une force élastique H, l'air sec qui s'y trouve a pour pression $H - F$; la même masse d'air sec avait, dans l'atmosphère, une pression égale à $H - f$,

son volume, avant de pénétrer dans les tubes en U, était donc d'après la loi de Mariotte :

$$V \frac{H - F}{H - f}.$$

Nous avons vu (392) comment on estime le poids p d'un volume connu $V \frac{H-F}{H-f}$ de vapeur de densité 0,622, sous la pression f et à la température t on a :

$$p = V \frac{H - F}{H - f} \frac{f}{(1 + \alpha t)} \times \frac{1^{gr},293 \times 0,622}{760}.$$

On pourra donc déduire de cette égalité, la valeur de f et par suite celle de $\frac{f}{F}$.

445. La méthode chimique, très-rigoureuse en elle-même, exige qu'on fasse passer un grand volume d'air dans l'appareil de dessiccation, et que cet air y circule lentement, afin qu'aucune portion de vapeur n'échappe à la condensation. C'est dire, que chaque expérience doit durer plusieurs heures, et que par suite la méthode est tout à fait impropre à nous renseigner sur les variations brusques de l'état hygrométrique de l'air.

CHAPITRE IV

CALORIMÉTRIE

CHALEURS SPÉCIFIQUES

446. Jusqu'à présent, nous nous sommes surtout occupés de saisir les relations qui lient la température avec les changements corrélatifs produits dans le corps par l'intervention de la chaleur. Il est cependant indispensable, dans un assez grand nombre de cas, de mesurer les quantités de chaleur mises en jeu et d'obtenir une expression numérique de leurs valeurs.

447. **Unité de chaleur.** — Pour mesurer une grandeur, on choisit arbitrairement une grandeur de même espèce qui serve d'unité, à la condition, toutefois, que cette unité pourra toujours être facilement obtenue. Dans le cas de la chaleur, on est convenu de prendre, pour terme de comparaison, *la quantité de chaleur nécessaire pour élever un kilogramme*

d'eau liquide de 0° *à* 1° ; c'est ce qu'on nomme une *calorie*. C'est évidemment cette même quantité de chaleur, qu'il faudrait enlever à un kilogramme d'eau prise à 1° pour la refroidir jusqu'à 0°.

On a reconnu qu'en mélangeant 1 kilogramme d'eau à 0° avec 1 kilogramme d'eau à 30°, on obtient 2 kilogrammes d'eau à 15° ; de même en mélangeant 1 kilogramme d'eau à 0° avec 1 kilogramme d'eau à 50°, on a 2 kilogrammes à 25°. En variant ce genre d'essais, on arrive à cette conclusion qu'un poids constant d'eau absorbe, en montant de 0° à $t°$, autant de calories qu'il en perd en descendant de $2t$ degrés à t degré, ou bien encore, autant de calories qu'il faudrait lui en donner pour le faire passer de $t°$ à $2t°$. Ce fait important, qui n'est vrai pour l'eau que lorsque $2t$ ne dépasse pas 50° ou 60°, sera bientôt utilisé comme moyen calorimétrique.

En résumé, l'expérience précédente nous conduit à ce résultat que nous voulons mettre bien en évidence, au commencement de ce chapitre sur la calorimétrie : un kilogramme d'eau liquide exige toujours la même quantité de chaleur, pour élever sa température d'un degré, quelle que soit d'ailleurs la température initiale, du moins tant que cette température initiale ne dépasse pas 60°.

448. Si le mélange, au lieu d'être fait avec deux poids égaux d'un même corps est effectué en employant des substances de nature différente, le résultat est tout autre. Ainsi, 1 kilogramme d'argent à 50°, plongé dans 1 kilogramme d'eau à 0°, amène une température finale à 2°,69. Dans les mêmes conditions

Le fer amènerait..................	5°,11
Le mercure........................	1,61
L'essence de térébenthine...... ...	14,93

Il suit de là que 1 kilogramme de chaque substance exige, pour que sa température propre s'élève de 1 degré, un nombre déterminé de calories; mais ce nombre change beaucoup quand on passe d'un corps à un autre. On appelle chaleur spécifique d'un corps *le nombre de calories nécessaire pour élever de* 0° *à* 1° *la température de l'unité de poids de ce corps.*

La chaleur spécifique étant une constante numérique qui sert à caractériser une substance, au même titre que le coefficient de dilatation, la densité, etc., il était nécessaire de la déterminer avec exactitude pour les différents corps. Deux méthodes principales ont été employées dans ce but.

449. **Méthode du puits de glace.** — Cette méthode imaginée par Black s'appuie sur une donnée expérimentale que nous apprendrons à déterminer dans ce chapitre même, à savoir qu'un kilogramme de glace à 0° exige pour fondre, sans changer de température, 79,2 calories. Ceci connu, un certain poids du corps, dont on veut obtenir la chaleur spécifique, est porté

à une température connue (200°), puis introduit dans une cavité creusée à l'avance dans un bloc de glace fondante (*fig.* 199) : ce sera, par exemple, un poids de fer égal à 100 grammes. Cette cavité, d'abord essuyée avec soin dans son intérieur, est recouverte, après l'introduction du corps, d'un couvercle de glace à 0°. Au bout d'un certain temps, la température du corps est descendue à 0°, et la chaleur, qu'il a cédée en se refroidissant, a été exclusivement employée à fondre une partie de la glace formant les parois de la cavité. On recueille avec soin et on pèse toute l'eau provenant de cette fusion ; soit $0^k,00348$ son poids ; et soit x la chaleur spécifique du fer.

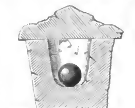


Fig. 199.

450. Pour calculer x, nous raisonnerons de la manière suivante : la glace a gagné, pour fondre, $79,2 \times 0,00348$ calories qui ont été perdues par $0^{kil},1$ de fer, quand la température de ce métal s'est abaissée de 200°. Donc un seul kilogramme de fer perdrait, si sa température s'abaissait d'un degré, un nombre x de calories exprimé par l'égalité suivante :

$$x = \frac{0,00348 \times 79,2}{0,1 \times 200} = 0,0137.$$

En général, si l'on appelle P le poids du corps, t sa température, p le poids de glace fondue, il faut écrire :

$$Pxt = p \times 79,2,$$

d'où :

$$x = \frac{p \times 79,2}{Pt}.$$

Cette méthode très-simple n'est pas susceptible d'une grande précision, parce qu'il règne toujours quelque incertitude sur l'estimation du véritable poids de glace fondue. Quand on retire le corps solide de la cavité creusée dans le puits et qu'on fait écouler l'eau provenant de la fusion partielle de la glace, une portion de cette eau reste adhérente, soit au corps solide, soit aux parois de la cavité, et l'on comprend qu'il soit très-difficile d'en tenir un compte exact. Pourtant, l'erreur que l'on commet, en estimant le poids de glace fondue, se trouve multipliée par 79,2 ; elle est donc loin d'être négligeable.

451. **Méthode des mélanges.** — On donne au corps, sur lequel on veut opérer, la forme d'un anneau aplati ou toute autre telle que sous un volume donné, il offre la plus grande surface possible ; on évalue son poids p qui sera $0^k,1$ par exemple, et on le porte à une température connue t que nous supposerons de 200°. D'autre part, dans un vase de cuivre à parois très-

minces, le *calorimètre*, que l'on a soin d'isoler de tout corps bon conducteur de la chaleur, est introduit un certain poids d'eau P, soit $0^k,2$ qui y prend une température stationnaire t' égale à celle de l'air ambiant 15°; un thermomètre sensible, plongé dans cette eau, en donne à chaque instant la température. Ces préparatifs réalisés, le corps chaud porté à une température $t = 200°$ est plongé dans l'eau froide à 15°; il est agité au sein de la masse liquide, pour que l'équilibre de température s'établisse promptement, et la température finale θ du mélange est déterminée avec soin. Soit cette température égale à 16°,26. L'opération est dès lors complète.

452. Voici maintenant le raisonnement qui conduira à la solution : 1 kilogramme de fer, en s'abaissant de 1°, perd un nombre x de calories, qui représente la chaleur spécifique du métal; $0^{kil},1$ en s'abaissant de $(200° - 16°,26) = 183°,74$, doit perdre $0,1 \times 183,74 \times x$ calories. Cette chaleur perdue par le métal a servi à élever la température de $0^{kil},2$ d'eau de $(16°,26 - 15°) = 1°,26$; et comme la chaleur spécifique de l'eau est prise pour unité, le nombre de calories gagné par ce liquide sera donc $0,2 \times 1,26$. Il y a nécessairement égalité entre la chaleur perdue par le métal et la chaleur gagnée par l'eau, et l'on aura :

$$0,1 \times 183,74 \times x = 0,2 \times 1,26,$$

d'où :

$$x = \frac{0,2 \times 1,26}{0,1 \times 183,74} = 0,0137.$$

Il n'y a plus qu'à généraliser le raisonnement que nous venons de faire.

Pour avoir la valeur de x, il faudra toujours écrire que la chaleur perdue par le corps pour descendre de t' à θ, est égale à la chaleur gagnée par l'eau pour monter de t à θ ; la première s'obtient (règle générale), en multipliant le poids du corps par sa chaleur spécifique et par l'abaissement de température qu'il subit ; elle a pour valeur $px\,(t-\theta)$; la seconde se réduit à $P\,(\theta - t')$, puisque la chaleur spécifique de l'eau est égale à 1 : ce que donne l'équation :

$$p \times x\,(t - \theta) = P\,(\theta - t'),$$

d'où on déduira la valeur de x :

$$x = \frac{P\,(\theta - t')}{p\,(t - \theta)}$$

453. **Corrections.** — Il faut remarquer que cette valeur ainsi obtenue ne serait pas très-exacte ; car nous avons négligé plusieurs circonstances de l'expérience qui influent sur la température finale. Ainsi, le vase métallique

qui contient l'eau, a participé aux mêmes variations de température que le liquide; il en est de même du verre et du mercure, qui constituent le thermomètre plongeant dans le bain. En outre, l'air ambiant peut avoir cédé de la chaleur au mélange, ou bien lui en avoir enlevé, selon que sa température était plus haute ou plus basse que celle de ce dernier. Soient p_1 le poids du vase, p_2 celui de l'enveloppe vitreuse du thermomètre et p_3 celui du mercure que l'instrument renferme; soient c_1, c_2, c_3 les chaleurs spécifiques des trois corps, on écrira que la chaleur cédée par le corps chaud égale la chaleur prise par l'eau, par le vase et par le thermomètre pour monter de t' à θ.

$$(1) \qquad px\,(t-\theta) = (P + p_1c_1 + p_2c_2 + p_3c_3)\,(\theta - t').$$

Ces produits p_1c_1, p_2c_2, etc. représentent l'*équivalent en eau* des corps auxquels ils se rapportent.

454. **Méthode de compensation.** — Reste l'influence de l'air extérieur. Pour se mettre à l'abri de ses effets, on a quelquefois employé la méthode de compensation due à Rumford. Une première expérience d'essai est d'abord tentée, elle donne une certaine élévation thermométrique du bain égale à $(\theta - t')^\circ$. Alors, dans une seconde expérience qui est définitive, on commence par abaisser de $\frac{\theta - t'}{2}$ degrés au-dessous de celle de l'air ambiant la température du calorimètre, qui s'élève finalement à peu près de $\frac{\theta - t'}{2}$ degrés au-dessus de celle de l'air : donc, dans la première moitié de l'expérience, le mélange a pris de la chaleur au milieu environnant, dans la seconde il lui en a cédé : une compensation tend à s'établir. Malheureusement, elle est toujours incomplète, parce que les deux phases de l'expérience n'offrent jamais la même durée et que par suite le gain et la perte de chaleur ne sont pas équivalents.

454 *bis*. **Remarque sur la méthode.** — Pourvu que t ne dépasse pas 100° ou 120°, la valeur trouvée pour x est la même quelle que soit t. Ce résultat justifie la proportionnalité que nous avons admise (452) entre la perte de chaleur subie par un corps et l'abaissement correspondant de sa température, en écrivant $Px\,(t-\theta)$.

455. **Perfectionnements apportés à la méthode des mélanges par M. Regnault. — Détermination de la température initiale des corps.** —Quelques-unes des données numériques, qui entrent dans la formule (1), sont d'une détermination assez délicate. C'est M. Regnault qui, le premier, a su donner à la méthode des mélanges toute la précision désirable.

1° Il faut que la température initiale du corps chaud, au moment de son immersion dans le bain, soit exactement connue. A cet effet, le corps réduit en fragments est introduit dans un petit panier de fils de cuivre très-

léger V (*fig.* 200), au centre duquel est disposée une cavité cylindrique C', qui entoure le réservoir d'un thermomètre à mercure. De cette façon, l'in-

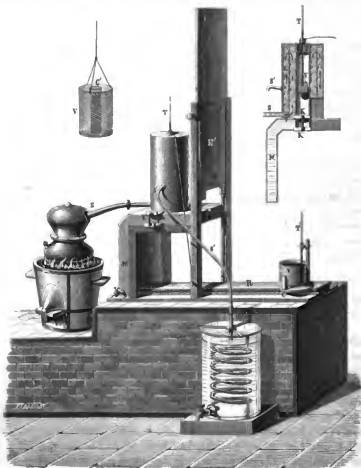


Fig. 200.

S tube amenant la vapeur qui circule dans les compartiments I et E de l'étuve. — S'S' tube qui conduit la vapeur au serpentin où elle se condense. — T thermomètre donnant la température du corps. — KK double plaque qui ferme le bas de l'étuve. — E' registre. — N calorimètre. — C chariot qui le porte. — R rail en bois. — T' thermomètre qui donne la température du calorimètre. — M écran d'eau froide. — V panier qui sert à contenir le corps. — C' cavité où se place le thermomètre T.

strument qui donnera la température du corps plonge au milieu même de la masse. Ce panier, après que le poids du corps qu'il renferme a été évalué, est suspendu par des fils de soie au centre d'une étuve formée de

trois manchons concentriques de fer-blanc ou de laiton. Dès lors, au contact du panier, se trouve seulement de l'air chaud, qui ne peut se renouveler, car la partie centrale de l'étuve est close, en bas, par un tiroir K, à lames métalliques qui glissent dans des coulisses; et elle est close en haut, par un bouchon de liége qui retient le thermomètre T. La vapeur d'eau fournie par une chaudière arrive, par un tube S, dans le manchon I, où elle circule d'une manière continue, pénètre ensuite dans le manchon E, pour préserver le compartiment I du contact de l'air extérieur qui le refroidirait et s'échappe enfin par S' dans un serpentin où elle se liquéfie. Par ce moyen, la substance contenue dans le panier atteint, au bout d'un certain temps, une température stationnaire exactement indiquée par le thermomètre T.

456. **Immersion.** — 2° Il faut que le corps chaud pénètre dans l'eau froide, avant de perdre aucune portion de chaleur. A cet effet, le calorimètre N renfermant un poids d'eau connu, à une température initiale fournie par le thermomètre T', est porté par le chariot C qui, poussé à la main, glisse sur une sorte de rail de bois, et arrive rapidement juste au-dessous de l'étuve. Arrivé là, le calorimètre se trouve protégé contre le rayonnement de la chaudière et de l'étuve par un vase M rempli d'eau froide et percé en K d'une ouverture circulaire dont la forme est indiquée par la figure. A un moment donné, un aide rend libre le fil qui supporte le panier, enlève le registre E', retire le tiroir K et laisse tomber le panier dans le calorimètre N, qui à son tour est ramené promptement, en glissant sur le rail, à sa position initiale.

457. **Observation de la température finale.** — 3° La température finale du mélange doit être rapidement atteinte et exactement mesurée. Dans ce but, un observateur muni d'une lunette suit à distance la marche de la colonne mercurielle dans le thermomètre T' pendant qu'un aide agite le panier dans le bain. Les surfaces de contact de l'eau avec le corps réduit en fragments, étant très-multipliées, le temps total compris entre l'observation de la température initiale T', et celle de la température finale θ, ne dépasse pas en moyenne 4 minutes.

Pour calculer x, on suit la marche précédemment indiquée; seulement, il faut tenir compte de la chaleur apportée par le métal qui forme le panier. Si π en représente l'équivalent en eau, on devra écrire dans le premier membre de l'équation (1) $(px+\pi)(t-\theta)$. Du reste π est toujours très-petit par rapport à px.

D'autre part, le vase N est porté soit sur des pointes de bois, soit sur des fils fins croisés, il n'y a donc aucune perte sensible de chaleur par le support; mais il s'effectue avec le milieu ambiant des échanges calorifiques, qui rendent une correction nécessaire.

458. **Influence du milieu ambiant.** — Si la différence des tempéra-

tures du calorimètre et de l'air ambiant demeurait constante pendant un temps fini, on pourrait déterminer, à l'avance, par des expériences directes, quelle est la perte ou quel est le gain de chaleur, par seconde, qui correspond à cet excès. Mais, la différence en question est variable à chaque instant et le calcul rigoureux des quantités de chaleur perdues ou gagnées ne saurait être aussi simple. M. Regnault a reconnu que, vu la petitesse de la correction, on pouvait, sans inconvénient, procéder de la manière suivante :

On partage, en deux périodes, l'intervalle de temps pendant lequel s'exécute l'expérience. Première période : depuis l'observation de t' jusqu'au retour du chariot au point de départ, elle dure en moyenne 30″. On suppose que, pendant ce temps, l'eau du calorimètre se maintient à la température initiale, qui est toujours inférieure de 1 ou 2 degrés à celle de l'air extérieur. Deuxième période : depuis le retour du chariot jusqu'à l'observation de θ, on l'obtient en retranchant 30″ du temps total écoulé. On admet que, pendant le premier quart de cette seconde période, l'eau se maintient à la température extérieure, et par suite n'éprouve ni gain ni perte, et que, pendant les trois quarts restants, l'eau possède la température du maximum. De cette façon, l'eau prend de la chaleur à l'air pendant la première période et lui en cède pendant les trois quarts de la seconde.

Pour évaluer le gain et la perte, on a étudié à l'avance le refroidissement du même calorimètre dans des conditions identiques à celles de l'expérience, et on en déduit la fraction de degré dont s'abaisserait par seconde la température du calorimètre pour un excès e de température. Dans les expériences de M. Regnault, cette fraction F avait été trouvée égale à 0,0001386 e. Alors, en mettant à la place de e la différence initiale de température entre l'air extérieur et le calorimètre, en multipliant la valeur de F par 30, on avait le gain de chaleur pendant la première période. Par un calcul semblable, on obtenait la perte pendant les trois quarts de la période suivante, e représentant cette fois l'excès final de la température du calorimètre sur celle de l'air. Le gain retranché de la perte donne la valeur et le signe de la correction qu'il faut ajouter à l'élévation de température observée $(\theta - t')$.

459. **Chaleur spécifique des liquides.** — Dans le cas des liquides, on peut employer deux méthodes : ou bien se servir du liquide à étudier au lieu d'eau dans le calorimètre et y plonger, à une température connue et sous un poids connu, un corps solide de chaleur spécifique déterminée à l'avance ; c'est alors la chaleur spécifique du liquide qui devient l'inconnue à dégager de la formule (1) (453) ; ou bien, quand on ne possède le liquide qu'en petite quantité, on le place dans de petits tubes de verre à parois minces, qu'on introduit dans le panier de l'appareil de M. Regnault ; on suit d'ailleurs, pour le reste de l'opération, la marche que nous venons d'indiquer dans le cas des solides.

460. Le choix de l'eau, comme liquide calorimétrique employé à peu près exclusivement dans la méthode des mélanges, n'est pas très-heureux; car l'eau est de tous les corps celui, dont la chaleur spécifique se trouve la plus grande; une erreur très-petite sur l'évaluation de θ (457) entraîne un changement notable de la valeur de x. Aussi a-t-on quelquefois employé l'essence de térébenthine, dont la chaleur spécifique est à peu près la moitié de celle de l'eau. Dans ces derniers temps M. H. Sainte-Claire Deville s'est servi avec beaucoup de succès, dans le même but, du mercure, dont la chaleur spécifique n'est que les 33 millièmes de celle de l'eau.

461. **Résultats généraux.** — 1° Pour un même corps, la chaleur spécifique est plus grande à l'état liquide qu'à l'état solide. Exemples :

Eau liquide	1
Eau solide	0,5
Brôme liquide	0,111
Brôme solide	0,084
Mercure liquide	0,0333
Mercure solide	0,0324

462. 2° Pour un même corps pris sous le même état, la chaleur spécifique croit avec la température. Ainsi :

	Chaleur spécifique moyenne.	
	Entre 0° et 100°.	Entre 0° et 200°.
Zinc	0,0927	0,1015
Cuivre	0,0940	0,1013
Argent	0,0557	0,0611

463. 3° Pour une même substance chimique, la chaleur spécifique dépend de la constitution moléculaire et des actions mécaniques ou physiques auxquelles elle a été antérieurement soumise. En général, à une augmentation de densité, correspond une diminution de chaleur spécifique.

	Densité.	Chaleur spécifique.
Charbon de bois	2,00	0,241
Graphite	2,50	0,202
Diamant	3,50	0,147

464. **Loi de Dulong et Petit.** — Ces deux expérimentateurs ont reconnu que, le produit de la chaleur spécifique d'un corps simple par son poids atomique était un nombre constant. Ainsi :

	Chaleur spécifique.	Poids atomique.	Produit.
Mercure	0,0333	1250,00	41,60
Fer	0,0138	350,00	39,83
Étain	0,0562	737,00	41,42
Bismuth	0,0308	1312,00	40,41

Plomb............	0,0314	1293,75	40,62
Cobalt...	0,1069	368,75	39,42
Cadmium	0,0567	700,00	39,69
Soufre....	0,2025	200,00	40,50
Sélénium	0,0837	496,87	41,59

Ce produit varie, comme on voit, dans des limites peu étendues; mais ces variations s'expliquent : il suffit de rappeler que les chaleurs spécifiques des corps simples ont toutes été prises entre les mêmes intervalles de température, quoiqu'il soit certain que ces corps ne sont comparables entre eux, à ce point de vue, qu'autant que l'on place, chacun d'eux, à une température déterminée variable de l'un à l'autre. En outre, la structure physique des corps soumis à l'essai exerce, nous l'avons déjà vu, une notable influence sur la chaleur spécifique.

465. **Exceptions à la loi précédente.** — L'argent, le potassium et le charbon, font exception à la loi précédente.

	CHALEUR SPÉCIFIQUE.	POIDS ATOMIQUE.	PRODUIT.
Argent	0,0570	1350	76,96
Potassium.........	0,1696	490	83,28
Charbon....... ...	0,2410	75	18,07

Il faudrait prendre, dans le cas des deux premiers corps, pour poids atomique, la moitié du nombre adopté, et dans le cas du charbon, le double de ce nombre, si l'on voulait faire disparaître cette anomalie : rien d'ailleurs ne s'y opposerait.

466. **Signification du produit p c.** — On remarquera que si l'on nomme c la chaleur spécifique, d'un corps et p son poids atomique, pc exprimera la quantité de chaleur nécessaire, pour élever de 1° la température de l'atome, c'est-à-dire chaleur spécifique de l'atome. La loi de Dulong et Petit peut donc s'énoncer de cette autre façon : Les atomes des différents corps simples ont la même chaleur spécifique.

467. **Loi concernant les corps composés.** — En comparant entre elles les chaleurs spécifiques des corps composés, M. Wœstyn a signalé ce fait très-simple, que l'atome du corps simple garde, dans le corps composé où il s'introduit, sa propre chaleur spécifique; si bien qu'en nommant p, p', p''...P, les poids atomiques des éléments simples et celui du composé, c, c', c''...C, et leurs chaleurs spécifiques n, n', n''..., les nombres d'atomes de ces corps simples, qui entrent dans la molécule du composé, on a, en général :

$$PC = npc + n'p'c' + n''p''c'' + \ \dots.$$

et comme

$$pc = p'c' = p''c'',$$

on a :

$$PC = (n + n' + n'' + \dots) pc.$$

CHALEURS LATENTES

468. **Chaleur latente de fusion.** — Quand un corps solide fond, sans changer de température, il absorbe, pour se constituer dans son nouvel état, une certaine quantité de chaleur. On nomme *chaleur latente* de fusion d'un corps le nombre de calories nécessaire, pour fondre 1 kilogramme de ce corps, sans en modifier la température.

469. **Expérience relative à la chaleur latente.** — On fait habituellement, dans les cours, une expérience, qui rend sensible l'absorption de chaleur et qui en permet au besoin la mesure approximative. Si l'on met dans un vase 1 kilogramme de glace à 0° et 1 kilogramme d'eau à 79°, on trouve après la fusion 2 kilogrammes d'eau à 0° *environ*. On peut donc en conclure que les 79 calories, que l'eau chaude a abandonnées, pour descendre à 0°, ont été uniquement employées à la fusion du kilogramme de glace; car il n'y a eu pour cette dernière substance, qu'un simple changement d'état, sans élévation de température. Mais cette expérience, qui est excellente pour donner une idée de la chaleur latente de la fusion, ne peut servir à la mesurer. On ne peut en effet tenir compte ni de l'eau qui mouille la glace, ni de la chaleur prise par le vase, ni de la chaleur fournie par le milieu environnant.

470. **Méthode générale.** — Pour déterminer cette nouvelle constante, on a recours à la méthode des mélanges. Prenons le cas le plus général. Le corps dont on veut mesurer la chaleur latente est d'abord pesé. Le poids P connu, on fond le corps, puis on le porte à la température T; on le plonge dans un poids p d'eau froide, prise à la température initiale t: le corps immergé se solidifie et le mélange arrive à la température finale θ. Appelant c et C les chaleurs spécifiques de la substance à l'état solide et à l'état liquide, T' sa température de solidification ou de fusion, l la chaleur latente de fusion; nous allons écrire que la chaleur prise par l'eau pour monter de t à θ est égale à la chaleur cédée par le corps liquide pour descendre de T à T', plus à la chaleur latente abandonnée au moment de la solidification, plus à la chaleur cédée par le solide, pour s'abaisser de T' à θ.

$$p(\theta - t) = PC(T - T') + Pl + Pc(T' - \theta).$$

471. **Chaleur latente de fusion de la glace. — Détermination de MM. de la Provostaye et Desains.** — La méthode employée par MM. de la Provostaye et Desains, pour mesurer la chaleur latente de fusion de la glace, est analogue, mais un peu différente. Un fragment de glace bien pure à 0° était essuyé avec du papier Joseph, puis introduit dans un poids p

d'eau à t, et cela dans des conditions telles que le calorimètre, qui était au commencement de l'expérience, un peu plus chaud que l'air extérieur, se trouvât à la fin, à une température θ un peu plus basse. La correction très-petite, due à la présence de l'air environnant, s'effectuait alors par un procédé semblable à celui qui a été décrit (458) à propos des chaleurs spécifiques. L'augmentation de poids du vase donnait la valeur P du poids de glace fondue.

On peut alors calculer l en suivant la marche ordinaire. La quantité de chaleur perdue par l'eau du calorimètre, qui était primitivement à $t°$ et qui est descendue à θ, est égale à $p\,(t-\theta)$ calories. Cette chaleur a servi à fondre la glace, qui a exigé pour sa fusion Pl calories, de plus l'eau provenant de cette fusion est montée de $0°$ à $\theta°$, ce qui a nécessité l'emploi de $P\theta$ calories. On aura donc l'égalité :

$$p\,(t-\theta) = Pl + P\theta$$

d'où :

$$l = \frac{p\,(t-\theta) - P\theta}{P}$$

Par cette méthode, la chaleur latente de fusion de la glace a été trouvée égale à 79.25.

472. Dans le cas des métaux et des alliages, la détermination de la chaleur latente est fréquemment sujette à une grande incertitude, parce qu'avant d'arriver à leur température de fusion, ces corps se ramollissent en absorbant de la chaleur : il est impossible de tenir compte de la fraction de cette chaleur ainsi disparue.

473. **Résultats numériques.** — Voici quelques-uns des nombres obtenus pour les corps simples métalliques et non métalliques.

Eau........................	79,25
Soufre	9,36
Phosphore........................	5,30
Zinc........................	28,13
Étain	14,25
Argent	21,67
Mercure	2,82

474. **Chaleur latente de vaporisation.** — On la définit : Le nombre de calories nécessaire, pour réduire en vapeur 1 kilogramme d'un liquide, sans amener aucun changement de température.

475. **Méthodes des mélanges. — Description de l'appareil.** — Pour mesurer la chaleur latente de vaporisation, on a encore recours à la méthode des mélanges. Rumford, Dulong, M. Despretz, ont employé successivement, en le perfectionnant, un appareil analogue à celui que nous allons décrire.

Dans une cornue tubulée CC (*fig.* 201) est placé le liquide, dont on veut évaluer la chaleur latente de vaporisation. Le col de cette cornue, incliné sur l'horizon, s'adapte au tube du serpentin S, qui occupe la partie centrale d'un vase cylindrique servant de calorimètre ; à la base de ce serpentin, est une portion élargie I qui sert de récipient au liquide condensé. Les thermomètres T, T sont destinés à mesurer la température de l'eau qui remplit le calorimètre et celle de la vapeur, avant son entrée dans le serpentin. Enfin, deux tubes verticaux terminés par les robinets R' et R'' permettent de faire communiquer la capacité intérieure du serpentin et de la cornue, soit avec l'air extérieur, et alors la vapeur se forme sous la pression de l'atmosphère, soit avec une atmosphère artificielle, dont on fait varier à volonté la force élastique. L'appareil est muni d'un écran E qui garantit le calorimètre du rayonnement direct de la cornue et du fourneau. En outre, un agitateur A, par un mouvement de va-et-vient dans le sens vertical, mélange intimement les couches d'eau inégalement échauffées du calorimètre.

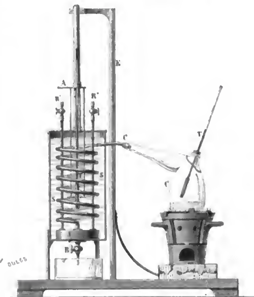


Fig. 201.

476. **Marche de l'expérience.** — Voici maintenant la marche de l'expérience. Le liquide est porté à l'ébullition dans la cornue, sans qu'il y ait encore communication de celle-ci avec le serpentin. Quand la vaporisation est en pleine activité, cette communication est établie ; dès lors la vapeur formée va se liquéfier dans le serpentin, où elle cède sa chaleur à l'eau du calorimètre, et se rend ensuite dans le récipient I à l'état de liquide. Au début d'ailleurs, on avait abaissé la température de l'eau du calorimètre de 4 à 5° au-dessous de celle de l'air, et on continue la distillation jusqu'à ce que la température de cette eau ait dépassé celle de l'air, du même nombre de degrés. A ce moment, on sépare la cornue du serpentin et on pèse le liquide recueilli en I ; on a ainsi le poids p de vapeur liquéfiée.

477. **Calcul des résultats.** — Soit T la température de la vapeur avant son entrée dans le serpentin : t celle de l'air ambiant, $t-n$ la température initiale de l'eau du calorimètre $t+n$ sa température finale, P son poids. Nous comprenons comme toujours dans P l'équivalent en eau du vase, qui forme le calorimètre et de ses annexes (serpentin, agitateur, thermomètre). Écrivons que la chaleur perdue par la vapeur en se liquéfiant, plus celle qu'abandonne le liquide résultant de cette liquéfaction, pour descendre de T à la température moyenne du calorimètre t, égalent ensemble la chaleur gagnée par le calorimètre, pour s'échauffer de $2n$ degrés.

$$p\lambda + pc(T - t) = 2nP,$$

d'où l'on déduira la valeur λ de la chaleur latente de vaporisation.

478. **Discussion de la méthode précédente.** — Le procédé, que nous venons de décrire, présente quelques causes d'erreur; voici les principales : 1° Une portion de la chaleur, qui échauffe l'eau du calorimètre, lui arrive par voie de conductibilité, à cause du contact immédiat de la cornue et du serpentin : l'écran E protégeant seulement le calorimètre contre le rayonnement direct du foyer : 2° la vapeur formée dans la cornue entraîne mécaniquement, sous forme de brouillard, de petites gouttelettes liquides, qui, se réunissant dans le récipient I, augmentent à tort la valeur de p.

479. **Perfectionnements dus à M. Regnault.** — La seconde de ces influences perturbatrices est éliminée dans l'appareil de M. Regnault par la disposition donnée au tube T, qui amène la vapeur de la chaudière au robinet distributeur A (*fig.* 202). Ce tube, d'une longueur de 4 mètres, se contourne en spirale S dans la chambre à vapeur, de manière que les gouttelettes entraînées, se déposant dans ce long parcours contre les parois du tube, puissent retomber dans la chaudière. D'autre part, il est protégé contre le refroidissement de l'air extérieur par un manchon E,

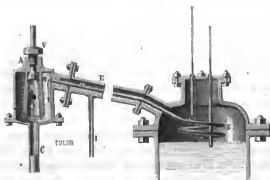


Fig. 202. — Coupe de l'appareil par un plan perpendiculaire à l'axe des tubes T_1 et T_2 de la figure 203 (*).

(*) ST tube qui conduit la vapeur dans l'espace A. — N noyau du robinet qui a son ouverture latérale vers le tube T_2, qui est représenté dans la figure suivante. — B cloche qui contient le noyau N et ne présente que deux ouvertures latérales, l'une vers T_1, l'autre vers T_2. — C tuyau du condenseur.

où la vapeur de la chaudière circule et par le tube I va se liquéfier au loin.

480. En outre, grâce au robinet distributeur A, l'expérience n'a, comme le dit M. Regnault, ni commencement ni fin : c'est-à-dire que l'ébullition de l'eau est depuis longtemps en pleine activité, et que les pièces métalliques de l'appareil ont déjà pris leur équilibre définitif de température, au moment où en faisant tourner le robinet de 90°, pour le faire passer de la position indiquée par la figure 203 à celle que nous avons représentée (*fig.* 202), on amène la vapeur par le tube T_2 dans le calorimètre auquel ce tube aboutit. De même le retour du robinet à sa position initiale interrompt, sans produire aucune perturbation, le passage de la vapeur dans le calorimètre.

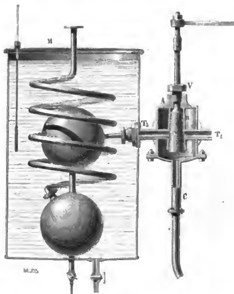


Fig. 203. — Coupe perpendiculaire à la précédente, la chaudière serait en arrière du plan de la figure (*).

481. **Description du robinet distributeur.** — Les figures ci-jointes permettent de comprendre le jeu et la fonction du robinet distributeur. La vapeur, arrivant de la chaudière par le tube T, pénètre comme l'indiquent les flèches dans la partie centrale creuse du noyau mobile N (*fig.* 202). Si ce noyau occupe la position représentée (*fig.* 203), la vapeur tout entière est conduite par le tuyau C dans le condenseur ; et à ce moment aucune portion de la vapeur ne saurait arriver dans le calorimètre. Si on ramène le robinet dans la première position (*fig.* 202), la vapeur, suivant la marche indiquée par les flèches, est conduite par T_2 dans le calorimètre, et il n'en arrive dans le condenseur que la portion voulue par l'opérateur. Celui-ci peut, en effet, régler l'introduction de la vapeur dans le condenseur ou la supprimer au besoin au moyen d'un robinet que nous n'avons pas figuré et qui se trouve sur le trajet du tuyau C.

482. **Double calorimètre.** — On remarquera en outre l'emploi si-

(*) M calorimetre. — A robinet distributeur. — N noyau dont l'ouverture latérale est derrière le plan de la figure et ne communique avec aucun des tubes T_1, T_2. — T_2 tube qui conduit au calorimètre M. — T_1 tube qui conduit à un second calorimètre non représenté.

multané de deux calorimètres semblables communiquant le premier avec T_2, l'autre avec T_1 ; un seul de ces appareils reçoit la vapeur tandis que l'autre fonctionne à blanc. Ce dernier, néanmoins, reçoit, pendant l'expérience, la même quantité de chaleur que l'autre, par voie de conductibilité ; il subit en outre la même influence de la part de l'air extérieur. On comprend donc, que les variations de température, estimées sur le calorimètre qui fonctionne à blanc, aient permis à M. Regnault de tenir compte, soit de l'excédant de chaleur transmise, soit des pertes et des gains calorifiques effectués par le calorimètre au contact de l'atmosphère environnante.

Enfin, en faisant communiquer la chaudière, le condenseur et les calorimètres avec une enceinte où la pression varie à la volonté de l'opérateur et soit mesurée par un manomètre à air libre, M. Regnault a pu évaluer les chaleurs latentes de la vapeur d'eau à diverses pressions.

483. **Résultats généraux.** — 1° A 100° la chaleur latente de vaporisation de l'eau est 536,67. Si on part de l'eau à 0° et qu'on ajoute les 100 calories nécessaires pour la porter de 0° à 100°, on trouve que la chaleur totale, qu'il faut donner à l'eau à 0° pour la convertir en vapeur à 100°, est de 636,67 unités de chaleur.

484. 2° A mesure que la température de vaporisation de l'eau s'élève ou que la pression de la vapeur saturée augmente, la chaleur latente va en décroissant, tandis que la chaleur totale croît. Les nombres obtenus par l'expérience peuvent, d'après M. Regnault, rentrer sensiblement dans la formule empirique suivante :

$$\lambda = 606,5 + 0,305T,$$

dans cette formule, λ est la chaleur totale, et T la température de vaporisation. On peut prendre approximativement la formule :

$$\lambda = 607 + \frac{1}{3}T,$$

qui est facile à retenir. Ainsi, l'on a les résultats qui suivent :

TEMPÉRATURE.	PRESSION.	CHALEUR LATENTE.	CHALEUR TOTALE.
0°	4mm,6	606,5	606,5
30	31 , 55	585,7	615,7
60	148 , 79	564,8	624,8
100	760 , 00	537,0	637,0
200	11688 , 96	467,50	667,5

485. 3° Pour les liquides autres que l'eau, la chaleur latente semble décroître, quand la densité de la vapeur augmente :

	DENSITÉ DES VAPEURS.	CHALEUR LATENTE.
Essence de térébenthine	5,01	69
Éther sulfurique.................	2,58	91
Alcool	1,61	208

CHALEUR DÉGAGÉE DANS LES ACTIONS CHIMIQUES.

486. Deux méthodes calorimétriques nous ont suffi jusqu'à présent pour les déterminations que nous avions en vue : la mesure des chaleurs spécifiques et celle des chaleurs latentes. La première méthode, peu exacte et d'un emploi restreint, est fondée sur l'absorption de la chaleur par la glace au moment de la fusion ; successivement étudiée par Wilke, Black, Lavoisier et Laplace, elle est abandonnée aujourd'hui. La seconde, dite méthode des mélanges, a acquis une grande précision, depuis les perfectionnements que M. Regnault a apportés à sa mise en œuvre. Elle a rendu de grands services aux physiciens pour la détermination de la valeur numérique des deux éléments dont l'étude nous a occupé dans ce chapitre ; et à diverses époques, Rumford, Dulong, MM. Despretz, Favre et Silberman l'ont employée, avec beaucoup de succès, pour mesurer les quantités de chaleur dégagées, soit par les réactions chimiques, soit par les animaux pendant leur vie.

487. **Chaleur dégagée dans les combustions.** — C'est par la méthode des mélanges que Dulong avait pu fixer et le nombre de calories que dégage, en brûlant dans l'oxygène, un poids constant des principaux combustibles, et la quantité de chaleur que met en liberté un métal quand il s'oxyde. Les combustions étaient produites dans une enceinte complétement entourée par l'eau d'un calorimètre. Le corps combustible et l'oxygène se rendaient dans cette enceinte et les produits gazeux de leur combinaison ne s'échappaient à l'extérieur, qu'après avoir pris la même température que le bain d'eau. Nous mentionnerons ici quelques-uns des nombres obtenus par le savant expérimentateur, et nous mettrons en regard les résultats des expériences plus récentes de MM. Favre et Silberman sur le même sujet. Le nombre de calories que nous inscrivons, correspond à la combustion d'un kilogramme de chaque substance dans l'oxygène.

	DULONG.	MM. FAVRE ET SILBERMAN.
Hydrogène	34601	34462
Oxyde de carbone	2490	2402
Alcool absolu	6962	7184
Charbon	7295	8080
Essence de térébenthine	11567	10852
Éther sulfurique	9431	9027
Huile d'olives	9862	»
Soufre	2600	2221

MM. Favre et Silberman ont encore appliqué la méthode des mélanges à l'estimation des quantités de chaleur, qui se dégagent dans les combinaisons chimiques produites par la voie humide. Cette étude les a conduits à

l'adoption d'une méthode calorimétrique, qui n'est au fond que la méthode ordinaire des mélanges, mais qui permet d'obtenir des mesures beaucoup plus promptes, au moins aussi exactes, et en outre de n'opérer qu'avec de petites quantités des substances.

488. **Calorimètre de MM. Favre et Silberman.** — C'est un thermomètre à mercure (*fig.* 204), dont la graduation, au lieu de mesurer les variations de température, sert à estimer, en calories, la chaleur reçue par l'instrument. Le mercure a une très-faible capacité calorifique, sa conductibilité est supérieure à celle des autres liquides; il y a donc avantage évident, au point de vue de la sensibilité des mesures, à employer ce liquide pour évaluer les quantités de chaleur dégagées, à la suite d'un phénomène quelconque. On l'introduit dans un grand ballon en verre R qui est muni de trois tubulures, et qui représente comme le réservoir d'un gros thermomètre. Ce ballon a une capacité d'un litre environ; et c'est comme au sein même de la masse liquide qu'il renferme, que se produisent les réactions chimiques, sources actuelles de la chaleur. Par ce moyen, toute la chaleur devenue libre pendant la réaction sert uniquement à échauffer la masse mercurielle et à la faire dilater. Dans ce but, un tube de fer M, qu'on appelle la *moufle*, reçoit un petit tube de verre très-mince V (*fig.* 205), où les réactions s'opèrent, et du mercure *m* (*fig.* 204) conduit la chaleur du tube à réaction jusqu'aux parois de la moufle. Un tube de diamètre étroit TT', divisé en parties d'égale capacité, ouvert à l'une de ses extrémités et soudé à une tubulure latérale du ballon, rend facile la constatation des accroissements de volume, que subit le mercure à chaque opération nouvelle. Pour éviter toute correction tenant à la déperdition de chaleur par l'instrument, le ballon est logé dans une enceinte O close de toutes parts, où il se trouve entouré de corps très-mauvais conducteurs : le liége, la ouate, etc. — Enfin, pour faire arriver, au commen-

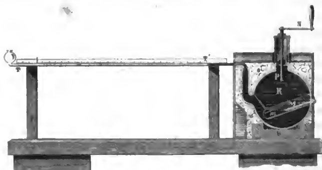


Fig. 204.



Fig. 205.

cement de chaque expérience, l'extrémité de la colonne mercurielle en un même point T' du tube qui est le zéro de la graduation, on a adapté à la tubulure supérieure un piston plongeur en acier P, mû par une vis placée à l'extérieur. Ce piston, en descendant ou en montant, déplace plus ou moins de mercure dans le ballon, et l'instrument est alors facilement réglé.

489. **Graduation.** — La graduation de l'appareil est très-simple. Un poids d'eau connu, P, est introduit à une température θ (la température de l'ébullition est la plus commode), au fond du tube M; elle s'y refroidit, descend à la température θ', et cède par suite au mercure $P(\theta - \theta')$ calories. Cet échauffement fait avancer la colonne mercurielle dans le tube TT' de n divisions ; on en conclut que chaque division correspond à un dégagement de $\frac{P(\theta-\theta')}{n}$ calories. L'instrument est dès lors gradué ; et désormais, dans un essai quelconque, il suffira d'observer la marche de l'extrémité de la colonne dans le tube TT' pour en conclure le nombre de calories dégagées au sein de la masse mercurielle.

490. **Résultats obtenus.** — En se servant de cet instrument, dont les indications très-promptes dispensent de tout calcul, MM. Favre et Silberman, dans leur grand travail sur la chaleur dégagée dans les actions chimiques, sont arrivés à des résultats importants ; nous en citerons quelques-uns : 1° Quand on fait brûler dans l'oxygène des poids égaux de différents alcools et éthers, on reconnaît que la quantité de chaleur dégagée décroît à mesure que la quanitité d'oxygène appartenant déjà à la substance va en augmentant. 2° Quand un gaz se dissout dans l'eau, la quantité de chaleur, mise en liberté, dépend de la nature du gaz et varie beaucoup d'un gaz à l'autre : un kilogramme de gaz ammoniac dégage 510 calories, tandis que le gaz acide sulfureux, pris sous le même poids, n'en fournit que 120. 3° En général, un même combustible donne plus de chaleur, quand on le brûle dans l'oxygène, que lorsqu'on opère la combustion dans le chlore ; tandis que 1 kilogramme d'hydrogène dégage en s'unissant à l'oxygène 34462 calories, il n'en abandonne que 23950 en se combinant au chlore.

CHALEUR DÉGAGÉE PAR LES ACTIONS MÉCANIQUES.

491. Jusqu'à présent, pour nous procurer la chaleur nécessaire dans nos expériences, nous avons eu recours, à peu près exclusivement, aux combustions ordinaires, à celles du bois, du charbon, du gaz de l'éclairage ; quelquefois nous nous sommes aussi servis de la chaleur solaire. Il y a pourtant des sources calorifiques, autres que les actions chimiques, autres que le soleil et sur lesquelles il importe d'arrêter quelques instants notre atten-

tion. Tous les corps, quel que soit leur état, peuvent devenir des sources de chaleur; il suffit pour cela de les soumettre à certaines actions mécaniques. Un gaz par la compression, de l'eau agitée dans un vase, une barre de fer sous le marteau, l'axe d'une roue qui frotte sur ses coussinets, représentent autant de sources calorifiques, rarement utilisables, il est vrai; mais dans lesquelles le dégagement de chaleur est tout aussi régulier que celui des sources ordinaires.

492. D'une manière générale, les frottements, les chocs, et en un mot, les résistances passives qui consomment en pure perte, dans les machines, une portion notable du travail moteur, engendrent de la chaleur. Il était important de mesurer avec exactitude, dans des conditions expérimentales bien définies, ces deux quantités : chaleur et travail mécanique, qui sont en corrélation intime, et dont l'une se montre quand l'autre parait s'anéantir. Parmi les nombreux essais tentés dans le but d'effectuer cette comparaison, nous décrirons seulement ici une expérience de M. Joule qui nous semble offrir une grande netteté.

493. **Chaleur dégagée dans le frottement. — Expérience de M. Joule.** — La chaleur dégagée dans le cours de cette expérience provient du frottement des couches d'eau soit entre elles, soit surtout contre les parois du vase qui contient le liquide. Le nombre de calories mis en liberté s'estime alors par la connaissance préalable du poids d'eau employé et par la mesure directe de l'élévation de température qu'elle éprouve. D'un autre côté, le travail mécanique, consommé par le frottement, se mesure directement par la chute d'un poids qui met l'appareil en mouvement.

Voici maintenant quelques détails sur la disposition des expériences. Un

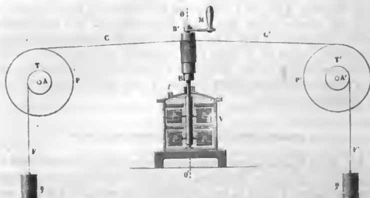


Fig. 206.

arbre vertical en laiton (*fig.* 206) porte seize palettes *p*, *p*, de même métal

qui, au moment où l'axe les entraîne, se meuvent entre des vannes horizontales qui sont fixes. Cet entraînement des lames métalliques a lieu dans l'intérieur d'un vase cylindrique, et c'est au sein même de ce liquide dans lequel les palettes sont immergées, que se produit le phénomène complexe du frottement des couches, par l'agitation qui a lieu. La rotation est communiquée à l'arbre, comme l'indique la figure, par l'intermédiaire du rouleau BB', à l'aide de cordons C et C' qui s'enroulent sur les deux poulies d'égal diamètre P et P'. Le mouvement des poulies a lui-même pour cause la chute des poids en plomb Q, Q' qui en descendant font tourner des treuils T, T' avec lesquels les axes des poulies sont intimement liés. Pour diminuer le frottement, ces axes A et A' sont portés par les circonférences de deux roues croisées comme nous l'avons déjà indiqué (59) pour la machine d'Atwood.

494. Calcul de l'expérience. — Par le frottement de l'eau agitée dans le vase, la température de cette eau s'élevait ; et la quantité de chaleur produite était facile à évaluer : elle s'obtenait en multipliant l'élévation de température par le poids de l'eau. Bien entendu, on avait soin de tenir compte de la chaleur absorbée par le vase, les palettes, etc., et de celle qui était enlevée par le milieu environnant.

Quant au travail absorbé par le frottement, voici son évaluation : Le travail moteur est $(Q + Q')H$, H représentant la hauteur de chute. Si les poids Q et Q' étaient arrivés à terre avec une vitesse nulle, tout le travail moteur aurait été détruit, en compensation de la chaleur produite. Mais il n'en est pas ainsi : et il faut retrancher du travail moteur total celui qui correspond à la vitesse finale v. Pour cela on calcule de quelle hauteur h devraient tomber les poids Q et Q' supposés libres, pour acquérir une vitesse égale à v et $(Q + Q')h$ représente alors la portion du travail moteur total, qui n'a pas été détruite par le frottement.

Une autre correction doit être faite : une portion du travail moteur a été évidemment consommée par la raideur des cordons, par leur frottement sur les poulies et par celui des axes des poulies sur leurs supports ; ce travail n'a contribué en rien à la variation de température du calorimètre. On en tenait compte par le moyen suivant : Le rouleau BB' était séparé de l'arbre qui portait les palettes, et après qu'on avait écarté le vase V, ce rouleau était soutenu vertical par une pièce distincte, de sorte qu'il fût toujours mobile autour de son axe vertical, les poulies supportant les mêmes poids Q, mais l'enroulement des cordons étant tel que l'un des poids descendait pendant que l'autre montait comme dans une machine d'Atwood. On cherchait, par tâtonnement, quel poids p il fallait ajouter à l'un des poids Q, pour que le mouvement du système devînt uniforme. Le produit de ce poids par la hauteur de chute donnait le nombre de kilogrammètres correspondant à cette portion de travail perdu.

494 *bis*. **Résultats.** — M. Joule a déduit de ses expériences, après avoir fait les corrections voulues, le nombre 430,24 pour représenter en kilogrammètres le travail absorbé par le frottement, lorsqu'une unité de chaleur était produite. En substituant le mercure à l'eau dans le calorimètre, il a trouvé un nombre très-voisin du précédent : 432,40. Ces deux résultats, on le voit, peuvent être considérés comme identiques.

495. **Équivalent mécanique de la chaleur.** — On est donc naturellement conduit à se poser cette question : la relation qui unit le travail mécanique détruit et la chaleur dégagée est-elle indépendante de la nature des substances qui servent d'intermédiaire pour opérer cette transformation, dont nous venons de constater la réalité ? Trouve-t-on toujours une équivalence absolue entre le travail détruit et la chaleur créée, entre la chaleur anéantie et le travail mécanique effectué ? A ces questions, voici ce que l'on peut répondre : Outre les expériences relatives au frottement qui sont simples, claires et exactes, d'autres ont été faites qui s'accordent à donner toujours ce travail de 430 kilogrammètres comme correspondant à une unité de chaleur. Dans l'électricité, nous aurons occasion d'en citer de nouvelles qui ont été exécutées par M. Favre dans des conditions très-différentes de celles qui viennent d'être définies. Pour le moment, nous devons nous borner à celles que nous avons fait connaître.

Mais dès à présent il importe de ne pas s'y tromper, il faut bien connaître ce qu'on doit entendre par cette équivalence : l'expérience de M. Joule est excellente dans ce but. Dans cette expérience, les substances employées : l'eau, les poids, n'ont été soumises à aucun changement moléculaire, l'eau à cause de sa constitution, qui rend indifférente la position relative de ses molécules, malgré les actions auxquelles elle a été soumise, s'est retrouvée à la fin telle qu'elle était au début. L'équivalence mécanique ne peut avoir lieu qu'à ces conditions : quand les conditions sont autres, il faut tenir compte du travail produit par les modifications imprimées aux corps. Ainsi, en laissant tomber un poids d'une hauteur connue sur une masse de plomb, vient-on à écraser cette masse ? de la chaleur se dégage, mais cette chaleur ne doit pas être mise en équivalence avec tout le travail mécanique représenté par le poids qui tombe : les molécules écrasées, déplacées, les vibrations des supports ont absorbé une partie du travail, et de ce travail absorbé il faut tenir compte. On doit faire ces corrections avant de comparer la chaleur dégagée et le travail produit.

CHAPITRE V

CHALEUR RAYONNANTE.

NOTIONS PREMIÈRES

496. La chaleur franchit les espaces vides de toute matière pondérable ; tout le monde le sait : car la chaleur du soleil ne parvient à la terre qu'après avoir traversé le vide des espaces planétaires. La chaleur n'est même pas arrêtée par quelques-uns des corps qui se trouvent sur son passage ; elle les traverse comme la lumière traverse le verre. On en trouve une preuve évidente dans la chaleur solaire, qui échauffe le sol malgré la couche d'air glacé des régions supérieures qui fait obstacle. La chaleur se propageant ainsi à distance s'appelle *chaleur rayonnante*.

497. **Expériences de Rumford.** — Rumford eut l'idée de montrer, par une expérience directe, que la chaleur peut se transmettre à travers le vide. A cet effet il construisit un baromètre AB (*fig.* 207), avec un ballon qui avait un col étroit d'environ 1 mètre de longueur. Au centre du ballon se trouvait le réservoir d'un thermomètre, dont la tige était soudée à la paroi qu'elle traversait. Avec la flamme du chalumeau, le col fut chauffé en C, au-dessus du mercure ; le verre se ramollit, et le ballon vide et fermé fut alors séparé par l'expérimentateur. L'appareil ainsi préparé fut plongé dans de l'eau bouillante (*fig.* 208), Rumford vit que le thermomètre s'échauffait beaucoup. L'expérience a réussi exactement de même avec le thermomètre suspendu dans le ballon par un simple fil de soie : on ne peut donc pas objecter que la chaleur se serait transmise par l'intermédiaire de la soudure. La chaleur allait donc au thermomètre en traversant le vide.

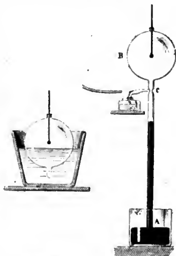


Fig. 208. Fig. 207.

498. **Division du sujet.** — Si l'on suit la chaleur rayonnante dans sa

marche, on voit quelles études partielles doivent amener à la connaissance complète du sujet. Il faudra d'abord s'occuper des conditions sous l'influence desquelles la quantité de chaleur envoyée par la source s'accroît ou diminue : en un mot il faudra étudier l'émission.

On devra rechercher les phénomènes qui ont lieu quand cette chaleur traverse le vide, l'air, ou tout autre corps : ce sont les phénomènes de propagation et de transmission.

Enfin la chaleur rayonnante arrivant à un corps est absorbée, ou bien elle est réfléchie régulièrement, ou encore renvoyée irrégulièrement. D'où trois études nouvelles : 1° Absorption; 2° réflexion ; 3° diffusion.

L'ordre suivant lequel les phénomènes s'accomplissent n'est pas celui que nous suivrons pour les présenter. Pour enchaîner plus méthodiquement les expériences et les théories, nous sommes forcés de donner tout d'abord quelques notions sur la propagation et sur la réflexion.

499. **Propagation.** — La chaleur se propage en ligne droite; de plus elle se transmet avec une vitesse d'environ 310 000 kilomètres (77 000 lieues) par seconde.

La première de ces lois se démontre, en interposant, entre un thermomètre et le foyer qui l'échauffe, un de ces corps, qui ne se laissent pas traverser par la chaleur et que l'on appelle *athermanes*. Toutes les fois que l'écran employé se trouve sur la direction des lignes droites, qui vont du foyer au thermomètre, la chaleur de la source est interceptée. Donc la chaleur ne peut pas aller en ligne brisée ou courbe : elle se meut en ligne droite.

La seconde proposition résulte de cette observation que le soleil fait immédiatement sentir sa chaleur, dès qu'il se découvre et que sa lumière vient à briller. Or on démontre en optique que la lumière se propage avec la vitesse que nous avons dite : on admet par analogie que la chaleur se meut avec la même vitesse.

499 *bis*. Si d'un point P comme centre, on décrit une sphère d'un rayon R, la surface de cette sphère sera $4\pi R^2$. Imaginons que le point P devienne une source d'où émane, à chaque unité de temps, une quantité Q de chaleur, cette chaleur arrivera sur la surface $4\pi R^2$ et l'unité de surface située à la distance R en recevra une quantité : $q = \frac{Q}{4\pi R^2}$. Si, dans cette formule, la distance R devient double, R^2 se trouve quadruplé, et par suite q devient 4 fois plus petit. Ce qui donne cette loi : les quantités de chaleur, reçues par une même surface, sont en raison inverse des carrés de distance.

500. **Lois de la réflexion.** — Lorsque la lumière solaire frappe une surface polie, elle retourne en partie vers le côté d'où elle était venue; on dit qu'elle se réfléchit. Si l'on place un thermomètre sur le trajet de la lumière, ce thermomètre indique que la chaleur accompagne la lumière

et se réfléchit comme elle. Il suit de là que les lois de la réflexion de la chaleur sont les mêmes que les lois de la réflexion de la lumière. Voici ces lois telles qu'elles ont été trouvées en optique par des méthodes que nous donnerons plus tard.

Appelons rayon incident (*fig.* 209 et 210), la ligne droite IC suivant laquelle la chaleur arrive sur la surface PQ ;

Rayon réfléchi, la ligne droite CR que suit la chaleur après la réflexion ;

Normale, la perpendiculaire CN élevée sur la surface PQ au point où le rayon incident frappe cette surface ;

On dit que l'angle ICN est l'angle d'incidence, et l'angle NCR l'angle de réflexion.

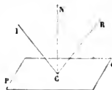


Fig. 209.

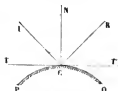


Fig. 210.

Les deux lois de la réflexion sont les suivantes:

1° Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

501. **Miroirs paraboliques.** — Ces lois, faciles à démontrer directement, quand on emploie la chaleur solaire, qui est très-intense, ne peuvent plus être mises aussi aisément en évidence pour la chaleur, qui émane d'une source artificielle, des charbons enflammés, de l'eau bouillante par exemple. D'habitude on démontre les lois de la réflexion pour cette espèce de chaleur en vérifiant, par expérience, une de leurs conséquences. Soient en effet (*fig.* 211) deux miroirs MN et M'N' dont les surfaces polies à l'intérieur sont paraboliques. Plaçons ces miroirs en regard l'un de l'autre, dans une position où leurs axes soient sur une même droite AA'. La géométrie démontre que, si les lois de la réflexion données plus haut sont vraies, il doit exister, en avant du premier miroir, un point F tel que tout rayon FC, qui part de ce point et qui vient rencontrer le miroir en un point C quelconque, donne un rayon réfléchi suivant une ligne CC' parallèle à l'axe AA'. La géométrie démontre en outre que le rayon CC', frappant le second miroir M'N', donne, par une nouvelle réflexion sur ce miroir un nouveau rayon C'F', qui coupe l'axe en un point F'. Ainsi tous les rayons partis du point F viennent, après deux réflexions, se couper tous en ce même point F'; et ceci ne peut avoir lieu que si les lois posées précédemment comme lois de la réflexion sont exactes.

La vérification expérimentale de cette conséquence se fait, en plaçant en F, une source de chaleur quelconque, et en observant, au moyen d'un appareil thermométrique, si en F' une concentration de chaleur considérable se manifeste. Le mode employé, pour montrer le phénomène à un

auditoire nombreux, consiste à placer, en F', un corps facile à enflammer, de la poudre-coton; en F on dispose un réchaud en fil de fer que l'on

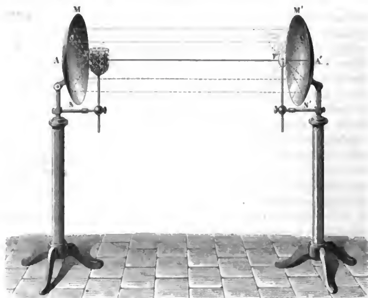


Fig. 211.

remplit de charbons allumés; et l'on voit que la poudre prend feu, dès que les charbons ardents sont introduits dans le réchaud. De plus, l'inflammation n'a pas lieu, si la poudre est placée en tout autre point de l'espace compris entre les deux miroirs.

502. **Autre expérience.** — Une expérience semblable peut être faite avec un seul miroir sphérique.

En effet, soit un miroir sphérique MN (*fig.* 203); soit C un point du mi-

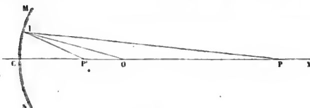


Fig. 212.

roir également éloigné de tous les points du bord et qu'on appelle centre de figure du miroir; soit O le centre de la sphère; la ligne CO prolongée

indéfiniment forme ce que l'on appelle l'axe du miroir. Or on démontre, en géométrie, que si, en un point P de cet axe, on place une source de chaleur, tous les rayons tels que PC, qui tomberont sur le miroir, donneront des rayons réfléchis, tels que CP', qui couperont tous l'axe, à très-peu près, au même point P' appelé le foyer conjugué de P. D'après cela, plaçons un corps inflammable en P', et un réchaud en P, et nous verrons que, le réchaud étant plein de charbons, la poudre-coton prendra feu.

503. **Appareil de Leslie.** — La disposition, que nous venons d'indiquer, a été employée par Leslie pour l'étude de la chaleur rayonnante. A cet effet, Leslie se servait (*fig.* 213), comme source de chaleur, d'un

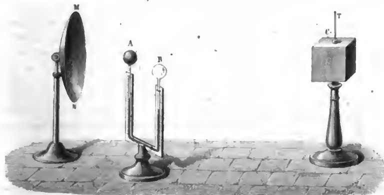


Fig. 213.

vase cubique de fer-blanc C, rempli d'eau maintenue à une température constante et voisine de 100°. Une face du cube placée perpendiculairement à l'axe du miroir, et rencontrée en son milieu par cet axe, envoyait de la chaleur, qui, après sa réflexion, venait se concentrer dans un petit espace, représenté par l'une des boules A du thermomètre différentiel. L'autre boule B, située en dehors de la direction des rayons réfléchis, était protégée par un écran contre le rayonnement direct du cube. Avec cet appareil, Leslie avait la possibilité de faire varier successivement : 1° la source de chaleur ; 2° la surface réfléchissante : 3° la surface absorbante. Pour cela, il lui suffisait de changer, soit la nature de la face du cube ; soit la matière dont le miroir était formé ; ou bien encore, de recouvrir la boule du thermomètre avec différentes substances.

Lorsque l'appareil est mis en expérience, la chaleur réfléchie par le miroir agit pour échauffer la boule A ; mais le milieu ambiant agit pour la refroidir, dès qu'elle s'est échauffée ; et c'est de cette double action que dépend la température indiquée par le thermomètre. Avant d'aller plus

loin. il importe donc, pour l'intelligence des résultats qui seront obtenus, de connaître l'effet produit par le milieu ambiant, dont l'action se combine à celle qu'il s'agit d'étudier : c'est la loi du refroidissement de Newton qui nous le donne.

504. **Loi de Newton.** — Newton a été amené par des considérations mathématiques à concevoir la loi suivant laquelle s'abaissent les températures d'un corps qui se refroidit : *Les abaissements de température que subit un corps pendant l'unité de temps, varient proportionnellement aux excès de la température de ce corps sur celle du milieu environnant.*

On démontre aisément cette loi par l'expérience. Il suffit d'observer deux thermomètres (*fig.* 214) : l'un T marque la température du milieu environnant, soit 15° ; l'autre T', placé à quelque distance et échauffé d'avance, se refroidit. On note la température de T' à un moment donné, soit 25° : l'excès de température est donc 25° — 15° ou 10°. Après une unité de temps, on note de nouveau la température, et on trouve qu'elle a baissé de 0°,44 : ainsi pour un excès de 10° l'abaissement de température pendant l'unité de temps est égale à 0°,44. On répète les mêmes observations, quand le thermomètre n'est plus qu'à 20°, c'est-à-dire, quand l'excès de température est réduit à 5° ; et l'on trouve au bout de l'unité de temps un abaissement de température égal à 0°,22. Ces deux expériences démontrent la loi : à un excès de moitié correspond un abaissement de température moitié moindre.

Fig. 214.

505. Mais une objection peut être faite : pendant chaque expérience, l'excès a été constamment variable. Dans la première, il a été décroissant depuis 10° jusqu'à 10° — 0°,44 = 9°,5. On ne peut donc pas dire que l'abaissement de température 0°,44 soit celui qui correspond à 10°, car successivement, l'excès a passé de 10° à 9°,56 par tous les intermédiaires. Ce nombre 0°,44 conviendrait réellement à un excès compris entre les deux extrêmes. En acceptant pour excès leur moyenne, qui est 9,78, on commettra encore une erreur ; mais l'erreur commise sera d'autant plus négligeable que la différence de ces deux excès sera plus petite. Il en est de même des résultats obtenus dans l'expérience précédente et 0,22 sera pris pour l'abaissement de température correspondant à l'excès 4,89. — Du reste, en prenant le rapport de ces excès moyens et le rapport des abaissements de température correspondants, on trouve qu'avec ces moyennes la loi de Newton est encore vérifiée : on a en effet $\frac{4,89}{9,58} = \frac{0,22}{0,44} = \frac{1}{2}$.

Par ce changement, nos résultats ne sont pas modifiés, et ici nous eussions pu négliger de faire la correction indiquée; mais cette correction sera nécessaire dans les circonstances, où l'on voudra obtenir l'abaissement de température correspondant à un excès donné; et même dans ce cas, les résultats ne seront acceptables que si les températures extrêmes diffèrent très-peu l'une de l'autre. Il faudrait, dans de pareilles circonstances, observer l'abaissement de température pendant un temps très-petit, et diviser cet abaissement par le temps pour avoir la vitesse du refroidissement. Mais les résultats ne seraient rigoureusement exacts qu'à la limite, comme nous l'avons dit à propos du mouvement varié (20). Cette limite, l'expérience ne l'atteint jamais directement, elle ne peut qu'en approcher : le calcul peut seul la donner.

306. **Autre énoncé de la loi de Newton.** — Lorsque la température d'un corps s'abaisse de 0°,44, ce corps perd une quantité de chaleur double de celle qu'il perdrait, si la température s'abaissait de moitié moins ou de 0,22 : cela résulte de la loi des chaleurs spécifiques. Par conséquent, on peut dire que les quantités de chaleur, perdues par un corps qui se refroidit, sont proportionnelles aux excès de la température de ce corps sur celle du milieu environnant.

307. **Observations sur la loi de Newton.** — Les diverses expériences, que les physiciens ont faites pour éprouver la loi de Newton, montrent que cette loi n'est exacte, comme Newton d'ailleurs l'avait dit, que dans le cas où l'excès de température est petit; cet excès ne doit pas dépasser 20°, et même il est bon qu'il n'atteigne pas cette extrême limite.

Il faut aussi faire bien attention que la loi de Newton n'est vraie qu'à une condition : c'est que le corps soumis à l'expérience ne soit modifié en aucune façon. Un changement apporté à la surface du thermomètre, peut altérer beaucoup la vitesse du refroidissement.

308. **Conséquence importante de la loi de Newton.** — Il est possible de maintenir un thermomètre à une température fixe, qui soit supérieure à celle de l'enceinte où il se trouve. Il suffit de fournir sans cesse à l'instrument la quantité de chaleur qu'il perd, et la loi de Newton apprend que, pour des excès de température différents, ces quantités de chaleur perdues devront être proportionnelles aux excès. De nombreux moyens permettent de réaliser des expériences, où un thermomètre soit soumis à la fois à l'action refroidissante du milieu environnant, et à l'action contraire d'une source. L'appareil de Leslie fournit un exemple de ce genre. Lorsque le cube rayonne, la température de la boule A s'élève, puis devient stationnaire, à 7° par exemple; dans une autre circonstance pour un rayonnement plus considérable elle s'élèvera à 10°. Si l'on compare les températures stationnaires obtenues dans ces expériences, on pourra dire que les excès de température 7 et 10 qui sont proportionnels aux quantités de

chaleur perdues par la boule, sous l'influence du milieu environnant, le sont aussi aux quantités égales qu'elle absorbe par suite du rayonnement du cube.

Ces études préliminaires nous permettent de poursuivre les expériences de Leslie.

EXPÉRIENCES DE LESLIE.

509. **Pouvoir émissif.** — Les différentes substances, placées dans des circonstances identiques et portées à la même température, ne rayonnent pas des quantités égales de chaleur. Il est aisé de s'en convaincre : un vase d'argent poli rempli d'eau bouillante ne paraît guère chaud à la main placée à quelques centimètres; tandis que dans les circonstances indiquées, le même vase, quand il est recouvert de noir de fumée, envoie une quantité de chaleur très-facile à percevoir.

On compare les *quantités de chaleur rayonnées* par différentes substances *à celle que rayonne une substance déterminée, qui se trouve portée à la même température et qui est placée dans les mêmes conditions :* l'on appelle *pouvoirs émissifs* les rapports ainsi obtenus.

Leslie avait choisi, pour unité, le pouvoir émissif du noir de fumée, et ce terme de comparaison a été conservé par les physiciens.

510. **Expériences de Leslie.** — Pour déterminer le pouvoir émissif, Leslie présente au miroir MN (*fig.* 215), une face du cube recouverte de



Fig. 215.

noir de fumée. La boule A du thermomètre différentiel s'échauffe; l'index se met en mouvement, mais il ne tarde pas à s'arrêter, à 10° par exemple; on note cette température stationnaire.

On présente une autre face du cube recouverte de la substance que l'on veut étudier, de gomme laque par exemple; on voit que l'index s'arrête à

un autre point : nous supposerons 7°. Leslie regardait les déplacements de l'index comme proportionnels aux quantités de chaleur envoyées; par conséquent le rapport de 7 à 10 exprimait le pouvoir émissif cherché.

511. Un raisonnement très-simple prouve qu'il en est ainsi dans les circonstances où Leslie se plaçait : il résulte, en effet, comme une conséquence de la loi de Newton (508), que les excès de température 7 et 10 sont proportionnels aux quantités de chaleur absorbées par la boule A dans les deux expériences. D'autre part, il est bien clair que les quantités de chaleur absorbées sont proportionnelles aux quantités de chaleur émises par la face du cube ; car si cette face du cube émet une quantité de chaleur double, le miroir en réfléchira deux fois plus et la boule en absorbera aussi une quantité deux fois plus grande (*). Donc les déplacements de l'index 7 et 10 sont proportionnels aux pouvoirs émissifs; le pouvoir émissif de la substance est 0,7.

512. **Influence de l'épaisseur.** — Les diverses couches de substances, dont on enduit la face du cube placée vis-à-vis le miroir, peuvent avoir des épaisseurs très-différentes, et on peut se demander jusqu'à quel point les résultats obtenus dépendent de ces épaisseurs. Pour résoudre cette question capitale, Leslie employait un vernis à la gomme laque très-clair, tel que mille couches de ce vernis formaient 1 millimètre d'épaisseur. Une première couche fut appliquée sur une face du cube et séchée : après dessiccation, Leslie détermina le pouvoir émissif de cette face. Il appliqua successivement de nouvelles couches et vit que le pouvoir émissif changeait, tant que l'épaisseur de la substance n'était pas $0^{mm},044$. Après cela, le pouvoir émissif devenait constant, quel que fût le nombre des couches ajoutées de nouveau. On voit donc que l'épaisseur de la couche, qui influe sur la valeur du pouvoir émissif, n'est pas très-considérable ; il est néanmoins important de constater que l'émission de la chaleur ne dépend pas seulement des molécules superficielles, mais encore de celles qui sont situées à une certaine profondeur dans la masse de la substance.

513. **Résultats.** — Leslie détermina par sa méthode les pouvoirs émissifs d'un grand nombre de substances. Nous nous contenterons ici de citer les deux résultats les plus importants. Il trouva que le noir de fumée possède un pouvoir émissif supérieur à celui de toute autre substance, et que les métaux polis, au contraire, ont un pouvoir émissif très-faible.

514. **Pouvoirs réfléchissants.** — Leslie appelait pouvoir réfléchissant

(*) La fin de ce raisonnement est exacte parce que Leslie employait toujours le cube porté à 100° comme source de chaleur; mais si l'on opérait avec des sources de chaleur de diverses espèces, on ne pourrait pas dire que la quantité de chaleur réfléchie serait double, quand la chaleur émise varierait elle-même dans le même rapport, ni que la quantité de la chaleur absorbée deviendrait deux fois plus grande pour une quantité double de chaleur reçue.

d'un corps le rapport entre la quantité de chaleur réfléchie par ce corps et la quantité de chaleur réfléchie par une autre substance prise comme terme de comparaison. Avec son appareil on peut comparer les pouvoirs réfléchissants. Pour cela on tourne toujours la même face du cube, celle qui est recouverte de noir de fumée, vers le miroir concave : cette face est placée en P (*fig.* 216). On reçoit les rayons réfléchis, avant leur rencontre en P', sur un petit miroir plan MN formé de la matière à étudier, qui par



Fig. 216.

une réflexion nouvelle les fait converger en un nouveau point P'', où l'on met la boule A du thermomètre différentiel. Les déplacements de l'index sont proportionnels aux pouvoirs réfléchissants. On le prouverait en répétant le raisonnement déjà donné (511).

515. **Résultats.** — Leslie a trouvé que le pouvoir réfléchissant d'une substance était inverse du pouvoir émissif qu'elle possédait. Ainsi le noir de fumée a un pouvoir réfléchissant nul ; les métaux polis, au contraire, réfléchissent abondamment la chaleur.

516. **Pouvoirs absorbants.** — L'appareil de Leslie ne peut pas servir à la détermination des pouvoirs absorbants ; car si l'on recouvre la boule A du thermomètre différentiel des substances à étudier et qu'on lui fasse parvenir toujours la même quantité de chaleur, cette boule ne subit pas des élévations de température proportionnelles aux quantités de chaleur absorbées, c'est-à-dire aux pouvoirs absorbants. Cela tient aux modifications mêmes que le thermomètre a subies. Ces modifications altèrent le pouvoir émissif de l'instrument d'une expérience à l'autre, et la vitesse de refroidissement, qui dépend du pouvoir émissif, n'est pas proportionnelle à l'élévation de température du thermomètre. Ainsi donc le raisonnement du § 511 ne s'applique plus, car il n'est plus possible de dire que les quantités de chaleur perdues soient proportionnelles aux excès de température.

517. Il faut donc une méthode nouvelle : on avait espéré la trouver. Il semblait évident que la chaleur, arrivant sur un corps, devait se diviser en deux parties, l'une qui est réfléchie, et l'autre qui est absorbée. S'il en était ainsi, l'on pourrait obtenir la valeur des pouvoirs absorbants par la connais-

sance des pouvoirs réfléchissants. Il suffirait de dire que la portion du faisceau calorifique, qui tombe sur un corps sans être absorbée, se trouve réfléchie et que par suite le pouvoir absorbant est complémentaire du pouvoir réfléchissant. Ce raisonnement n'est pas exact, parce qu'il est incomplet. Un grand nombre de substances ont la propriété de renvoyer en tous sens une partie de la chaleur qui leur arrive, ou, comme on dit, de la diffuser. La chaleur reçue se divise donc en réalité en trois parties : la chaleur réfléchie, la chaleur diffusée et la chaleur absorbée. Toutefois il est des corps qui ne diffusent pas la chaleur, et pour ceux-là la méthode est applicable, mais il n'y a guère que le noir de fumée et les métaux très-polis qui soient dans ce cas.

518. **Égalité des pouvoirs émissifs et absorbants.** — Toutefois une première solution générale de la question a été donnée par une expérience de Ritchie, qui a démontré que les pouvoirs émissifs et les pouvoirs absorbants sont égaux. Son appareil (*fig.* 217) est un véritable thermomètre différentiel, où deux cylindres égaux C′ et C″ tiennent la place des boules ; entre eux est disposé un cylindre C rempli d'eau chaude. Les bases B et N de ce dernier cylindre rayonnent vers les bases N″ et B′ qui sont en regard et très-voisines des précédentes. La face B qui est formée d'une lame d'argent, par exemple, rayonne vers N″ qui est enduite de noir de fumée, et inversement N recouverte de noir de fumée rayonne vers B′ qui est formée d'argent poli. L'appareil permet donc d'observer simultanément les effets des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs des deux substances mises en regard. Du reste les cylindres C′ et C″ ne présentent d'autre différence que celle qui a été signalée : ainsi ils sont tous deux égaux ; leur surface latérale, ainsi que la base, qui n'est pas tournée vers C, sont toutes deux recouvertes de noir de fumée. Ajoutons enfin que les faces en regard sont très-voisines.

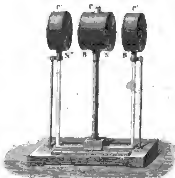


Fig. 217.

Par suite de la chaleur envoyée par C, les deux cylindres C′ et C″ s'échauffent, et pour qu'ils s'échauffent également (ce que l'on voit quand l'index du thermomètre reste au zéro), l'expérience prouve qu'il est nécessaire que C soit à égale distance de C′ et de C″. L'équilibre établi, les deux cylindres sont portés tous deux à la même température et perdent alors dans le même temps, la même quantité de chaleur sous l'influence du milieu environnant; mais leur température est stationnaire, donc ils

absorbent la même quantité de chaleur par le rayonnement de C. Ceci démontre l'égalité des pouvoirs émissifs et des pouvoirs absorbants. En effet, on sait déjà que le pouvoir émissif du noir de fumée est 1 et que le pouvoir émissif de l'argent est $\frac{1}{50}$; la surface B' reçoit donc une quantité de chaleur égale à 50 fois celle qui parvient à N". Mais cependant elle n'en absorbe pas plus que N". Donc, si cette surface B' recevait 50 fois moins de chaleur, c'est-à-dire la chaleur qui tombe sur N", elle en absorberait 50 fois moins. Ainsi, toutes choses égales d'ailleurs, l'argent absorbe 50 fois moins de chaleur que le noir de fumée. Son pouvoir absorbant doit être exprimé comme son pouvoir émissif par $\frac{1}{50}$ si on les rapporte tous deux au noir de fumée.

519. Cette expérience de Ritchie est des plus importantes ; elle prouve que la surface d'un corps exerce une action toute semblable, et sur les rayons, qui se présentent pour pénétrer dans le corps, et sur ceux qui tendent à en sortir. Les recherches ultérieures n'ont fait que confirmer en tout point ce fait; l'important, c'est de bien saisir sa véritable portée : bientôt (547 nous indiquerons quelles sont les conséquences qui en découlent.

520. **Application des études précédentes.** — Les résultats précédents trouvent leur application journalière soit dans les recherches scientifiques, dans les usages domestiques, soit encore dans les travaux industriels. Veut-on que le refroidissement d'une substance échauffée se produise avec lenteur? il faut l'entourer préalablement d'une lame métallique bien polie. C'est ce que nous faisons dans un grand nombre d'expériences de physique, c'est ce qui se fait tous les jours dans la vie domestique, lorsque, pour conserver des boissons chaudes, on se sert de théières d'argent. Si l'on veut, au contraire, que le corps échauffé rayonne beaucoup de chaleur vers les espaces environnants, on devra le recouvrir d'une substance dont le pouvoir émissif soit considérable ; le noir de fumée, quand il est possible de l'employer, est le corps qui convient le mieux. Ainsi dans les expériences sur le pouvoir réfléchissant, Leslie n'a pas manqué de tourner constamment vers le miroir la face du cube recouverte de noir de fumée : il avait ainsi des déplacements plus appréciables de l'index.

Relativement aux pouvoirs absorbants, des remarques analogues peuvent être faites. Un corps froid, soumis à l'influence d'une source de chaleur, doit-il s'échauffer rapidement ? on aura soin de recouvrir ce corps d'une substance dont le pouvoir absorbant soit considérable. Inversement, si l'on veut que le corps ne s'échauffe pas ou s'échauffe peu, on le recouvrira d'un métal poli. Voici un exemple pris dans le sujet même : les déplacements de la colonne liquide dans le thermomètre différentiel qui sont en général assez faibles, deviennent plus grands, lorsqu'on recouvre de noir de fumée, la boule qui est soumise au rayonnement. C'est ce qu'indique la figure 215 qui représente la boule A noircie entièrement.

521. Les habitants des pays chauds exposés à l'ardeur des rayons solaires, se sont couverts de vêtements blancs, qui absorbent très-peu la chaleur du soleil. L'importance de la couleur du tissu est si grande, qu'on peut la reconnaître par cette simple expérience, qui consiste à appliquer la main sur le corps d'un animal tacheté de noir et de blanc. Quand l'animal est resté quelque temps exposé au soleil, la différence de température des places blanches et des places noires est très-sensible. Mais il ne faut pas dire, comme on le fait trop souvent, que ces résultats se déduisent des phénomènes étudiés par Leslie. Ce physicien, en effet, n'a jamais déterminé que les pouvoirs émissifs des corps chauffés à 100°. En s'appuyant ensuite sur l'expérience de Ritchie (518), on ne peut en déduire que les pouvoirs absorbants des corps pour la chaleur provenant d'une source portée à la même température ; et il n'est pas vrai, comme nous ne tarderons pas à le démontrer, que les corps absorbent dans les mêmes proportions, et la chaleur obscure et la chaleur solaire. Sur cette question, le besoin de se garantir d'une chaleur excessive, a donné des règles qui ont précédé celles que la science n'a été en mesure d'établir que beaucoup plus tard.

APPAREIL DE MELLONI.

L'appareil de Leslie est demeuré le plus délicat que l'on ait su employer pour l'étude de la chaleur rayonnante, jusque vers 1830, époque où d'heureuses découvertes, réalisées dans une autre branche de la physique, ont permis de construire des thermomètres différentiels beaucoup plus sensibles. Avec ces instruments nouveaux, les phénomènes déjà connus ont été étudiés avec une plus grande précision, et d'autres phénomènes sont apparus, que les thermomètres anciens auraient été impuissants à dévoiler.

522. **Thermomètre différentiel de Nobili et de Melloni.** — Le thermomètre différentiel, qu'il faut maintenant connaître, se compose de deux parties : l'une que l'on appelle pile thermo-électrique, l'autre qui est le galvanomètre.

Pile thermo-électrique. — Cette pile (*fig.* 218) se compose d'une série de barreaux d'antimoine et de bismuth soudés les uns à la suite des autres ; chaque barreau B de bismuth et A d'antimoine, est parallèle au barreau précédent et placé tout près de lui, mais sans le toucher : il n'y a de contact qu'aux soudures. L'ensemble est disposé de façon que les soudures de rang impair 1, 3, 5, 7 se trouvent d'un côté et les soudures paires de l'autre. La figure 218 est une figure théorique qui représente cette disposition. La figure 219 est le modèle de la pile elle-même, qui

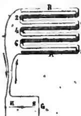


Fig. 218.

est enveloppée à l'extérieur d'un prisme de laiton et armée de tuyaux, qui ne laissent arriver la chaleur que dans une direction déterminée.

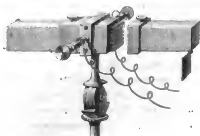


Fig. 219.



Fig. 220.

Galvanomètre. — A chacun des barreaux extrêmes (*fig.* 218) on attache l'une des extrémités d'un fil de cuivre qui suit les contours d'un cadre de bois, au milieu duquel se trouve une aiguille aimantée horizontale et mobile sur un pivot vertical, qui la soutient en son milieu. Le cadre est dans le plan vertical, qui contient l'aiguille ou dans un plan parallèle voisin. Cet ensemble, formé par l'aiguille et par le fil enroulé sur le cadre, constitue le *galvanomètre* G.

Expérience. — Dans ces conditions, si l'on chauffe les soudures de rang pair, un courant électrique se développe, circule à travers le fil et l'aiguille aimantée dévie ; si l'on chauffe les soudures de rang impair, un courant inverse a lieu et l'aiguille dévie en sens contraire ; quand on chauffe à la fois et également les soudures paires et les impaires, l'aiguille reste immobile.

Galvanomètre de Nobili. — Mais si le galvanomètre était ainsi constitué, l'aiguille ne se mettrait en mouvement que pour des différences de température assez considérables. Pour donner plus de sensibilité à l'appareil, Schweigger enroule le fil de cuivre, non pas une seule fois sur le cadre, comme nous l'avons fait jusqu'ici, mais lui fait faire un grand nombre de tours ; alors il faut que ce fil soit recouvert de soie pour que les tours successifs ne viennent pas en contact métallique l'un avec l'autre. De plus, Nobili eut une idée qui a contribué plus que toute autre à la sensibilité de l'appareil. L'aiguille unique est remplacée (*fig.* 220) par un système de deux aiguilles NS et S'N' placées l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur du cadre. Ces deux aiguilles, presque identiques, sont fixées à un même axe vertical, rigide et soutenu par un fil de cocon très-fin F. Ce système, tel que le pôle nord de l'une des aiguilles est du même côté que le pôle sud de l'autre, dévie, même par des courants excessivement faibles, qui circulent dans le fil contourné d'ailleurs un grand nombre de fois autour du cadre.

523. **Sensibilité.** — L'appareil de Nobili et de Melloni est, on le voit, un *thermomètre différentiel*, puisqu'il accuse une différence de température des soudures placées de chaque côté. Sa sensibilité est si grande, qu'il n'est pas rare de trouver des instruments, tels qu'une bougie placée à 1 mètre d'un côté de la pile, fait de suite dévier les aiguilles d'un

angle de 15°. Sous l'action d'une source beaucoup plus puissante, le thermomètre de Leslie resterait immobile.

524. **Appareil de Melloni.** — Melloni a employé cet instrument à l'étude de la chaleur rayonnante. Dans ce but la pile P (*fig.* 221), élevée sur un

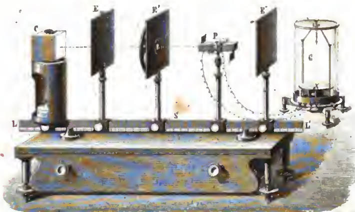


Fig. 221.

pied, est mise en regard de diverses sources de chaleur, parmi lesquelles se trouve le cube de Leslie C. Des écrans E, E'' formés par de doubles lames métalliques, garantissent chaque côté de la pile contre le rayonnement extérieur. Enfin un écran E' est percé d'une ouverture qui limite le faisceau de chaleur qui se rend à la pile. On peut au moyen d'un diaphragme rétrécir plus ou moins ce faisceau, selon que l'expérience l'exige. Le pied de chacune de ces pièces embrasse, à sa partie inférieure, une règle divisée LL' le long de laquelle il peut se déplacer. Pour faire une expérience, on abaisse l'écran E qui est mobile autour d'une charnière; la chaleur de la source passe et l'aiguille du galvanomètre dévie.

525. **Graduation.** — Mais avant d'expérimenter, il faut connaître à quelle quantité de chaleur correspondent les diverses déviations de l'aiguille du galvanomètre.

Dans ce but, on emploie deux sources de chaleur *de petite étendue*, et on les place du même côté de la pile, toutes deux presque sur l'axe, mais l'une un peu à droite, l'autre un peu à gauche. On cache l'une d'elles, l'autre agit seule: on note la déviation produite, soit 5° par exemple; on fait agir la première source toute seule à son tour, et on l'éloigne ou on l'approche jusqu'à ce qu'elle produise la même déviation de 5°. Il est bien clair que, si ces deux sources viennent à agir simultanément, la quantité de chaleur reçue par la pile sera double de ce qu'elle était dans chacune des

expériences précédentes ; or on trouve justement que la déviation est double, c'est-à-dire de 10°. Il en est toujours de même, pourvu qu'on ne dépasse pas une déviation de 20°. Par conséquent, nous pouvons dire que, si l'on prend, pour unité, la quantité de chaleur qui, reçue sur une face de la pile, fait dévier l'aiguille de 1°, une quantité de chaleur double produira une déviation de 2°, une quantité triple amènera une déviation de 3°; en d'autres termes, la déviation, tant qu'elle ne dépasse pas 20°, est proportionnelle à la quantité de chaleur reçue. Généralement, les physiciens essayent de ne pas dépasser cette limite dans leurs expériences. Pour aller au delà, il faut connaître, par exemple, la quantité de chaleur, qui correspond à une déviation quelconque. Veut-on celle qui se rapporte à 30°, on fait agir les deux sources simultanément jusqu'à ce que cette déviation de 30° soit obtenue; puis on cache successivement chacune d'elles. On obtient alors une déviation par exemple de 16°, quand la première agit seule et de 17° quand la seconde agit seule. D'où l'on conclut qu'une déviation de 30° correspond à une quantité de chaleur de 16 + 17, c'est-à-dire 33.

526. Avec l'appareil nouveau qui est entre nos mains nous allons commencer une nouvelle étude, celle de la transmission de la chaleur à travers les corps.

DES DIVERSES ESPÈCES DE CHALEUR.

527. **Transparence des corps pour la chaleur.** — L'air, l'eau et la glace se laissent traverser par la chaleur; il en est ainsi d'un assez grand nombre de corps gazeux, liquides ou solides : Prévost, de Genève, et de Laroche l'ont démontré par de nombreuses expériences. Pour en citer une seule, mais qui ne laisse aucun doute dans l'esprit, il suffit de dire qu'une lentille de glace, exposée au soleil, concentre la chaleur à son foyer, si bien que l'amadou, le bois peuvent s'enflammer, comme si on se servait d'une lentille de verre. La glace, qui a laissé passer une si forte proportion de chaleur, n'a pas pu cependant dépasser 0°; la chaleur qu'elle a absorbée n'a servi qu'à déterminer un commencement de fusion à la surface. Les substances qui se laissent ainsi traverser par la chaleur sont dites *diathermanes*.

Toute chaleur, quelle que soit son origine, ne traverse pas également une même substance. Une lame de verre n'empêche pas la chaleur solaire d'arriver abondamment à un observateur placé derrière elle, et chacun en se mettant derrière une vitre peut en faire l'expérience; tandis que cette lame placée devant un calorifère, intercepte presque toute la chaleur qui passait avant son interposition. De Laroche avait, dès l'année 1814, fait d'excellentes expériences sur ce sujet ; mais l'appareil de Melloni a permis de pousser plus loin l'étude commencée.

528. **Expériences de Melloni.** — Les diverses sources de chaleur em-

ployées sont 1° le cube de Leslie C (*fig.* 221), 2° une lampe de Locatelli S (*fig.* 228), 3° un fil de platine rougi (*fig.* 223), ou bien 4° une lame de cuivre (*fig.* 222) chauffée à 400° environ, ou même encore un faisceau délié de chaleur solaire. Voici la marche d'une expérience : L'appareil disposé, comme le représente la figure 221, on abaisse l'écran E; la source agit alors directement. On note la déviation de l'aiguille, soit 15°. On interpose une lame diathermane L (*fig.* 224), une lame de verre, de cristal de roche, d'alun, ou toute autre, que l'on place derrière E', en fixant en S (*fig.* 221) le pied S' qui porte la plaque. On note la nouvelle déviation : elle n'est plus que de 5° par exemple. On en conclut que par l'interposition de la lame les $\frac{5}{15}$ ou les 0,33 de chaleur incidente ont été transmis. Cette conclusion toutefois n'est exacte, que si la lame qui est exposée au rayonnement ne s'échauffe que très-peu, assez peu pour que son action soit nulle sur la pile. La sensibilité de l'appareil qui permet de placer la source très-loin est très-avantageuse dans ce cas. On constate d'ailleurs que l'échauffement de la lame est négligeable en s'assurant que la déviation ne change pas, quelle que soit la durée de l'expérience. Le tableau suivant est emprunté à l'ouvrage de Melloni :



Fig. 222.



Fig. 223.



Fig. 224.

CHALEUR TRANSMISE A TRAVERS DES LAMES TOUTES D'UNE MÊME ÉPAISSEUR ÉGALE A $2^{mm},6$

(La chaleur incidente étant prise pour unité).

NATURE DE LA SUBSTANCE.	NATURE DE LA SOURCE DE CHALEUR.		
	LAMPE DE LOCATELLI.	PLATINE INCANDESCENT.	CUIVRE A 400°.
Sel gemme	0,92	0,92	0,92
Fluorine	0,72	0,69	0,33
Spath d'Islande	0,39	0,28	0
Verre (suivant les espèces)	0,39 à 0,66	»	»
Cristal de roche	0,38	0,28	0,08
Eau	0,13	0,02	0
Alun	0,9	0,02	0
Glace	0,6	0,005	0

Ce tableau montre à la fois et l'influence de la source sur la transmission

et l'action inégale qu'exercent les substances employées sur une même espèce de chaleur.

529. **Transmission à travers le sel gemme.** — Mais parmi toutes les substances, il en est une qui présente une particularité des plus importantes. La quantité de chaleur qu'elle laisse passer est toujours à peu près la même, quelle que soit la nature de la source, et quelle que soit l'épaisseur de la lame. Elle laisse passer les 0,92 de la chaleur qui se présente. MM. de La Provostaye et P. Desains ont montré que ce résultat n'était pas absolument exact, mais il l'est à très-peu près.

530. **Réfraction de la chaleur.**—Non-seulement il y a diverses espèces de chaleur comme de Laroche l'avait déjà montré, mais aussi chaque source de chaleur n'est pas homogène; elle envoie des rayons de diverses espèces. Une expérience calquée sur celle, que Newton avait faite pour séparer les couleurs de la lumière solaire, sert à le démontrer très-nettement. Sur le trajet de la chaleur envoyée par une source. Melloni, à l'imitation d'Herschell, place un prisme (*fig.* 226), mais un prisme de sel gemme G, ce qu'Herschell n'avait pas fait, parce qu'il ne savait pas, comme Melloni, que le sel gemme se laisse traverser à peu près également par toute espèce de chaleur. Ce prisme est posé sur un plateau (*fig.* 225) et la chaleur, après l'avoir traversé, est reçue sur une pile P très-étroite. Une règle additionnelle porte la pile, et cette règle est mobile autour d'un axe vertical, qui passe par le centre du plateau. La pile placée dans diverses positions analogues à celle qu'elle occupe en P, reçoit une portion de la chaleur, qui diverge à la sortie du prisme. On reconnaît, par la déviation de l'aiguille du galvanomètre, l'intensité du flux calorifique des diverses régions du faisceau transmis.



Fig. 225.

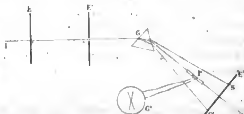


Fig. 226.

Si la source de chaleur est en même temps lumineuse comme une lampe de Locatelli, ou encore mieux un rayon solaire, on voit qu'une surface blanche, placée à quelque distance du prisme, est éclairée des couleurs du *spectre solaire*, qui a été obtenu par Newton, au moyen de ce même procédé. Elles sont dans l'ordre suivant: violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge. La pile arrêtée successivement dans chacune d'elles, indique une température peu élevée dans le violet, et de plus en plus forte à mesure que l'on approche du rouge. Au delà du rouge, là où aucune lumière n'ap-

paraît. l'élévation de température est encore plus considérable. Puis cette élévation décroît et à une distance du rouge assez grande elle est nulle.

La chaleur qui se manifeste dans les parties lumineuses est appelée chaleur lumineuse; et la chaleur qui se manifeste dans les parties obscures est dite chaleur obscure. L'expérience, qui vient d'être faite, montre que la chaleur solaire contient des rayons obscurs aussi bien que des rayons lumineux. Elle montre aussi qu'il existe un grand nombre d'espèces de chaleur lumineuse et un grand nombre d'espèces de chaleur obscure. Enfin un même corps émet des espèces de chaleur d'autant plus nombreuses que sa température est plus élevée : on le reconnaît par une expérience identique à la précédente.

531. **Transmission des diverses espèces de chaleur.** — La chaleur qui sort du prisme de sel gemme dans des directions différentes, possède des propriétés toutes différentes. La chaleur obscure traverse presque complétement une lame de sel gemme enfumée, tandis qu'elle est totalement arrêtée par une lame d'alun. Inversement la chaleur lumineuse traverse abondamment une lame d'alun, tandis qu'elle est arrêtée par la plaque de sel gemme enfumé.

532. **Conséquence.** — La chaleur solaire passe en grande abondance à travers une lame de sel gemme enfumé et elle traverse en grande abondance aussi une lame de verre ; mais un résultat curieux, c'est qu'elle ne traverse pas un assemblage formé par ces deux lames. Ce résultat s'explique par ce qui précède. Le verre et le sel séparés laissent passer chacun une espèce de chaleur. Le premier laisse traverser la chaleur lumineuse, l'autre la chaleur obscure ; tous les deux réunis ne peuvent donc livrer passage ni à la chaleur lumineuse. ni à la chaleur obscure.

533. **Autre résultat.** — Une lame de verre de 1 millimètre d'épaisseur laisse passer la moitié de la chaleur, qui vient du platine incandescent. Si derrière cette première lame on en place une autre toute pareille, la chaleur qui se présentera devant cette seconde lame sera transmise en plus grande quantité. Pourquoi le verre intercepte-t-il dans ces deux cas la chaleur si inégalement? C'est que la chaleur, qui s'est présentée d'abord devant la première lame était composée de deux parties : une, qui est apte à traverser le verre et qui l'a traversée, et l'autre qui a été arrêtée; tandis que la seconde lame n'a reçu que de la chaleur riche en rayons que le verre peut transmettre en abondance.

534. **Analogies de la chaleur et de la lumière.** — Ces expériences, il faut bien le comprendre, sont tout à fait les analogues d'autres expériences qu'il est facile de répéter avec la lumière et que nous n'hésitons pas à citer ici, bien que l'optique n'ait pas été traitée dans les chapitres qui précèdent. Nous pouvons les citer, parce que tout le monde les a faites et chacun en a le souvenir. Que l'on se couvre les yeux d'une lame de verre

fortement colorée en rouge, par exemple, et que l'on regarde le spectacle offert par les objets extérieurs, on reconnaît de suite que les diverses espèces de rayons de lumière ne traversent pas également la lame. Les objets rouges se voient avec un éclat presque aussi vif que si la lame de verre n'était pas interposée; les autres objets s'obscurcissent; quelques-uns même, tels que les feuilles des arbres, paraissent noirs ou presque noirs. Si l'on place contre l'œil une lame colorée en vert foncé, les phénomènes seront autres : le rouge s'obscurcit, le vert paraît éclatant de lumière. Enfin que l'on superpose ces deux lames et qu'on place le système qu'elles forment sur le trajet du rayon lumineux; si elles sont convenablement choisies, aucun objet extérieur ne sera plus visible. Ainsi leur ensemble ne laisse pas passer de lumière, tandis que chacune d'elles séparément en eût laissé traverser une quantité considérable. Un objet blanc par exemple, invisible à travers les deux lames réunies, eût été très-facile à apercevoir soit à travers l'une, soit à travers l'autre.

535. Ces analogies, que de Laroche avait aperçues et que Melloni a fait ressortir par un grand nombre d'expériences, ont rappelé l'attention des physiciens sur ce sujet, et les ont poussés à rechercher, si tous les phénomènes relatifs à la lumière avaient leurs analogues dans la chaleur rayonnante; on peut affirmer aujourd'hui que la correspondance des deux ordres de faits s'est soutenue *sans aucune exception*.

DIFFUSION.

536. **Diffusion.** — C'est en suivant cette direction d'idées, que Melloni fut conduit à reconnaître la propriété que possède la chaleur de se diffuser. On sait, en effet, que la lumière, qui frappe un objet, le rend visible, quelle que soit la position de l'observateur. Un rayon lumineux n'est donc pas réfléchi suivant les lois seules de la réflexion (500), mais une partie de la lumière est renvoyée dans tous les sens, ou, comme on le dit, est diffusée. Melloni a montré qu'il en était de même pour la chaleur. Voici une expérience qui le prouve : un rayon de lumière solaire SI passe à travers une ouverture pratiquée à l'écran E' de l'appareil Melloni (*fig.* 227); il vient frapper une plaque LL' recouverte de céruse, en tombant suivant la normale SI. On dispose la pile en P dans une position telle qu'elle regarde le point d'incidence I, mais qu'elle fasse avec SI un angle quelconque. Ces disposi-

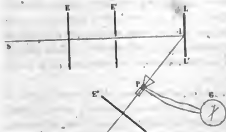


Fig. 227.

tions réalisées, on voit l'aiguille du galvanomètre se mettre en mouvement et indiquer ainsi l'arrivée d'un flux de chaleur.

Mais on pourrait objecter que la céruse s'est échauffée et que la chaleur, qui a suivi la route IP, est de la chaleur émise par la plaque et non de la chaleur renvoyée aussitôt que reçue. Voici les réponses qu'on peut faire à cette objection, et elles sont toutes trois très-concluantes : 1° l'aiguille marche dès que l'écran est découvert, avant donc que la plaque n'ait eu le temps de s'échauffer. 2° Si l'on retourne la pile de façon qu'elle regarde l'autre côté de la plaque, qui est enduit de noir de fumée, l'aiguille reste immobile au zéro; cependant le pouvoir émissif du noir de fumée ne le cède pas à celui de la céruse. 3° On interpose, entre la pile et la plaque recouverte de céruse, une lame qui soit capable d'intercepter la chaleur obscure, et l'on voit que l'aiguille du galvanomètre continue à dévier.

POUVOIRS RÉFLÉCHISSANTS.

537. La quantité de lumière réfléchie varie avec le poli de la surface réfléchissante; elle varie selon l'espèce de lumière qui se présente; enfin elle change avec l'inclinaison des rayons incidents. Il faut rechercher, s'il en est ainsi pour la chaleur : c'est ce qui a été fait par MM. de La Provostaye et P. Desains.

538. **Disposition de l'expérience.** — L'étude du pouvoir réfléchissant

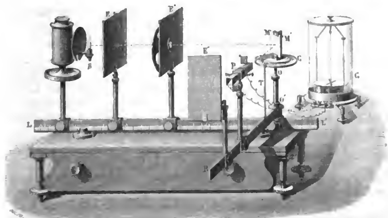


Fig. 228.

se fait, en ajoutant un petit miroir à l'appareil précédemment décrit. Sur un plateau circulaire C (*fig.* 228 et 229), divisé en degrés et placé horizontalement, un miroir plan vertical MM' peut tourner autour d'un axe vertical OO'. Une alidade mobile ON tourne avec lui et sert à indiquer la normale à ce

à ce miroir. Le pied du plateau fixé sur la règle divisée soutient une seconde règle O'R mobile autour de la même verticale OO' que le miroir. C'est sur cette règle que l'on met le pied de la pile P. La source de chaleur étant en S, l'écran E abattu, la chaleur émise frappe le miroir, et la chaleur réfléchie tombe sur la pile, qui doit être dirigée comme les lois de la réflexion l'exigent : un index porté par la tige T sert à placer la règle O'R dans la direction convenable.

Quoique ce détail soit secondaire, notons-le toutefois : avec un miroir de métal bien poli, le galvanomètre ne marche que si la pile est dirigée ainsi qu'il vient d'être dit : ce qui démontre directement les lois de la réflexion.

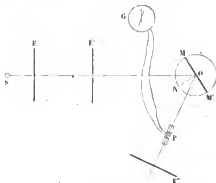


Fig. 229.

539. **Influence de la source.** — Cet appareil permet non-seulement de comparer les pouvoirs réfléchissants des différentes substances, mais aussi de comparer les quantités de chaleur réfléchies aux quantités de chaleur incidentes. Pour obtenir l'effet du rayonnement direct, il suffit de retirer le miroir, de faire tourner la règle O'R de façon qu'elle se trouve dans le prolongement de LO'. L'écran E étant abaissé, la chaleur arrivera à la pile, après avoir parcouru un chemin égal à la somme de ceux que suivaient le rayon incident et le rayon réfléchi : rien ne sera changé à la marche de la chaleur sauf la réflexion. La chaleur d'une lampe de Locatelli, par exemple, réfléchie par un miroir d'acier, tombe sur la pile et donne au galvanomètre une déviation de 6°; sous l'influence de la chaleur directe, la déviation est de 10°. D'où il résulte que les $\frac{6}{10}$ de la chaleur, qui tombe sur l'acier, subissent la réflexion. Voici les résultats de MM. de La Provostaye et P. Desains; ils montrent que la chaleur réfléchie par les métaux varie selon la nature de la source.

CHALEUR RÉFLÉCHIE PAR LES MÉTAUX POLIS, SOUS UNE INCIDENCE DE 45°.

NATURE DE LA SUBSTANCE.	NATURE DE LA SOURCE DE CHALEUR.		
	CHALEUR SOLAIRE.	ALCOOL SALÉ.	LAMPE DE LOCATELLI.
Argent	0,92	»	0,97
Acier	0,60	0,88	0,83
Métal des miroirs	0,64	»	0,86
Platine poli	0,60	0,86	0,86
Or	0,87	»	0,96
Laiton	»	0,94	»

540. **Réflexion sous diverses incidences.** — La proportion de lumière réfléchie varie avec l'incidence, et la loi de cette variation est connue depuis longtemps pour un certain nombre de substances. Cette loi est-elle la même pour la chaleur ? Le tableau suivant le démontre, il donne le pouvoir réfléchissant du verre frappé par des rayons solaires, sous des incidences variant de 20° à 80°. Les quantités de lumière réfléchies ont été déterminées par M. Jamin, et les quantités de chaleur par MM. de La Provostaye et P. Desains.

POUVOIRS RÉFLÉCHISSANTS DU VERRE POUR LA CHALEUR ET LA LUMIÈRE, SOUS DIVERSES INCIDENCES.

ANGLE D'INCIDENCE.	CHALEUR RÉFLÉCHIE.	LUMIÈRE RÉFLÉCHIE.
80°	0,551	0,546
75	0,407	0,408
70	0,306	0,308
60	0,179	0,183
50	0,116	0,117
40	0,080	0,081
30	0,061	0,061
20	0,050	0,050

Ce sont des résultats identiques, les proportions de chaleur et de lumières réfléchie sont les mêmes.

POUVOIRS ÉMISSIFS.

541. **Pouvoirs émissifs.** — L'étude des pouvoirs émissifs a été reprise par Melloni. Sa méthode a été décrite plus haut (524). La figure 230

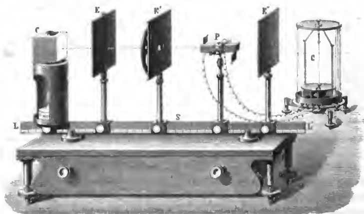


Fig. 230.

montre l'appareil en expérience. Voici les résultats qu'il a obtenus en employant le cube chauffé à 100°, comme source de chaleur :

Noir de fumée	100
Carbonate de plomb	100
Colle de poisson	91
Encre de Chine	85
Gomme laque	72
Surface métallique	12

Melloni, on le voit, attribuait à tous les métaux le même pouvoir émissif. MM. de La Provostaye et Desains ont repris avec un soin particulier ces expériences, en s'attachant à bien polir les surfaces, et ils ont trouvé les résultats qui suivent :

Noir de fumée	1
Argent bruni	0,02
Argent déposé chimiquement et mat	0,05
Or	0,04
Cuivre	0,05
Platine bruni	0,10

542. Comme la chaleur émise provient, non de la surface seule, mais aussi des couches situées à une profondeur sensible (512), il est à croire que cette chaleur qui vient de l'intérieur du corps ne peut émerger au dehors, sans avoir subi les actions que le corps exerce sur la chaleur qui lui

arrive du dehors; entre autres, elle doit subir des réflexions intérieures : et par suite toute cause qui modifie le pouvoir réfléchissant doit modifier le pouvoir émissif. Les causes influentes seront donc : le poli, la nature de la chaleur, l'inclinaison.

543. **Influence de l'état physique du corps.** — Déjà nous avons reconnu l'influence du poli. Aux remarques déjà faites nous devons ajouter que MM. Masson et Courtépée ont démontré que l'état physique d'une substance exerce sur le pouvoir émissif une influence des plus considérables. Les métaux en poudre impalpable, tels qu'on peut les obtenir par des procédés chimiques, ont tous à peu près le même pouvoir émissif que le noir de fumée.

544. **Influence de la température.** — L'étude des pouvoirs réfléchissants a montré que la surface d'un corps réfléchit très-inégalement les diverses espèces de chaleur qui viennent du dehors. Le pouvoir émissif varie-t-il donc aussi selon l'espèce de chaleur que le corps tend à émettre? Telle est la question que MM. de La Provostaye et P. Desains ont tenté de résoudre. Mais comment faire varier l'espèce de chaleur qui tend à s'échapper du corps? En élevant la température de ce corps (530).

Pour leurs expériences, ces physiciens se servaient, comme source de chaleur, d'une lame de platine échauffée par un courant électrique. Cette lame, recouverte entièrement d'oxyde de cuivre, a ses faces placées en regard l'une de la pile thermo-électrique A et l'autre de la pile thermo-électrique B, et à une distance telle que les déviations données par les deux galvanomètres soient identiques. On ôte alors, du côté de la lame située vers A, l'oxyde de cuivre, que l'on remplace par du borate de plomb; aucun autre changement n'est fait à l'expérience. On fait passer comme précédemment un courant que l'on augmente ou que l'on diminue jusqu'à ce que la pile témoin B, qui est restée vis-à-vis de l'oxyde de cuivre, donne la même déviation que dans la première expérience, et indique par là que la lame est revenue à la même température d'environ 600°. Le borate de plomb produit alors sur l'appareil A une déviation différente qui est les 0,75 de la précédente. Si l'on abaisse la température de la lame jusque vers 100°, le résultat change : les deux galvanomètres indiquent des déviations égales. Ce qui démontre que l'oxyde de cuivre et le borate de plomb possèdent le même pouvoir émissif à 100°, tandis que vers 600° le pouvoir émissif du borate n'est que les 0,75 de celui de l'oxyde de cuivre.

545. **Influence de l'inclinaison.** — L'inclinaison a de l'influence sur le pouvoir réfléchissant, donc elle doit en avoir sur le pouvoir émissif.

La face du cube de Leslie, dans nos expériences sur le pouvoir émissif, a été placée perpendiculairement à l'axe de la pile; donnons-lui une inclinaison; par cette inclinaison, la surface AB (*fig.* 231) placée en regard de la pile devient A'B'; elle est plus étendue, mais la chaleur qui arrive à l'instrument est émise obliquement. Avec le noir de fumée on trouve que

la déviation de l'aiguille n'est nullement changée; mais il n'en est pas de même pour les autres substances; la quantité de chaleur décroit comme le montre le tableau suivant :

INCLINAISON.	NOIR DE FUMÉE.	CÉRUSE.	OCRE.	VERRE.
Pouvoir émissif dans la direction normale.	1,00	1,00	1,00	0,90
Pouvoir émissif sous l'inclinaison de 70°....	1,00	0,84	0,91	0,75
Pouvoir émissif sous l'inclinaison de 80°...	1,00	0,66	0, 8	0,545

546. Les résultats relatifs au noir de fumée prouvent que la quantité de chaleur, envoyée par une surface A'B' (*fig.* 231) dans une direction quelconque, est égale à celle qu'envoie, dans la même direction, une surface AB perpendiculaire à la direction du rayonnement, pourvu que AB soit la projection de A'B'. Cette loi n'est vraie que pour le noir de fumée : elle peut s'exprimer sous une autre forme. En effet, si Q représente la quantité de chaleur envoyée par l'unité de surface dans la direction normale, si Q' représente de même la quantité de chaleur envoyée par l'unité de surface dans la direction oblique; SQ et S'Q' seront les quantités de chaleur envoyées au thermomètre par AB et par A'B' (en posant pour abréger AB = S et A'B' = S'). Ces quantités sont égales pour le noir de fumée, et pour lui seul; on aura donc : $SQ = S'Q'$. Mais si l'on appelle α l'angle que A'B' fait avec la direction OP du rayonnement, l'on aura $S = S' \sin \alpha$, et en remplaçant S par sa valeur il vient : $QS' \sin \alpha = Q'S'$; ce qui donne : $Q' = Q \sin \alpha$.

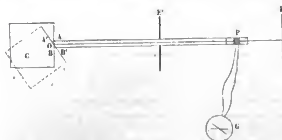


Fig. 231.

C'est la loi dite *des sinus :* la quantité de chaleur émise obliquement est proportionnelle au sinus de l'obliquité. Fourier regardait cette loi comme toujours vraie : MM. de La Provostaye et P. Desains ont démontré qu'elle ne se vérifiait qu'avec le noir de fumée seul. Pour les métaux, elle se trouverait exacte probablement dans des limites assez étendues, car de 0° à 70°, le pouvoir réfléchissant des métaux varie peu avec l'inclinaison.

POUVOIRS ABSORBANTS.

547. **Pouvoirs absorbants.** — Toutes les remarques, faites sur le pouvoir émissif et sur le pouvoir réfléchissant, s'appliquent à la question actuelle. Le pouvoir absorbant varie avec la nature de la source, avec l'état physique de la substance, avec l'inclinaison de la chaleur incidente.

Mais comment déterminer les pouvoirs absorbants ? Ceux des métaux se déduisent immédiatement des pouvoirs réfléchissants, par cela seul que toute la chaleur qui frappe une surface métallique parfaitement polie est absorbée ou réfléchie : il n'y en a qu'une quantité inappréciable qui soit diffusée. Ainsi, quand un faisceau de chaleur solaire tombe sur le métal des miroirs, MM. de La Provostaye et P. Desains ont trouvé que les 0,66 étaient réfléchis. Aucune diffusion n'est d'ailleurs sensible; donc le reste du faisceau, c'est-à-dire les 0,34 de la chaleur incidente, est absorbé, et ce nombre 0,34 représente le pouvoir absorbant de la substance. En procédant ainsi, on a le tableau :

POUVOIRS ABSORBANTS DÉDUITS DES POUVOIRS RÉFLÉCHISSANTS POUR LES INCIDENCES COMPRISES ENTRE 0° ET 70°.

	CHALEUR				
	SOLAIRE	DE LA LAMPE à MODÉRATEUR.	DE LA LAMPE de LOCATELLI.	DE LA LAMPE à ALCOOL SALÉ.	OBSCURE émise par une lame de cuivre chauffée à 400°.
Acier	0,42	0,34	0,175	0,12	»
Metal des miroirs .	0,34	0,30	0,145	»	»
Platine	0,39	0,30	0,170	0,14	0,105
Zinc	»	0,32	0,190	»	»
Étain	»	0,32	0,150	»	»
Laiton............	»	0,16	0,070	0,06	0,055
Or	0,13	»	0,045	»	0,045
Argent plaqué très-brillant.........	0,08	0,035	0,025	»	»

On remarquera que pour la chaleur, qui vient du cuivre chauffé à 400°, le pouvoir absorbant a la même valeur que le pouvoir émissif obtenu en faisant rayonner le cube de Leslie plein d'eau chaude. Mais si le rayonnement est tout autre, il n'y a plus égalité entre ces deux pouvoirs. Quelle est la signification de ces différences? La loi de Ritchie (518) serait-elle infirmée? Non, elle reste vraie; mais il faut bien le comprendre : elle n'est vraie qu'à une condition, c'est que la chaleur émise et la chaleur reçue soient de même espèce; elle n'est plus vraie si l'on veut comparer le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant, l'un pour une espèce de chaleur.

l'autre avec une espèce différente. En effet, il est bien évident, d'après tout ce qui a été dit, que ces pouvoirs ne peuvent être égaux, que si la surface exerce une même action sur les rayons qui entrent et sur ceux qui sortent : et cette dernière condition ne peut s'obtenir qu'avec les mêmes rayons.

548. **Pouvoirs absorbants déduits des pouvoirs émissifs.** — La loi de Ritchie se trouve vérifiée encore par une autre méthode. Les pouvoirs émissifs ont été obtenus directement (541) ; si l'on adopte les mêmes nombres pour exprimer les pouvoirs absorbants, on a :

Argent	0,02
Or	0,04
Cuivre	0,05
Platine	0,10

Ces résultats sont identiques à ceux du tableau précédent.

549. **Méthode directe. — Expérience.** — MM. de La Provostaye et P. Desains ont, en outre, découvert une méthode directe, pour l'évaluation des pouvoirs absorbants. Ils recouvrent successivement un même thermomètre des substances à étudier et l'exposent à l'action d'une même source de chaleur. Le thermomètre s'échauffe ; on attend qu'il prenne une température stationnaire. Quand cette température est atteinte, il est évident que, pendant des temps égaux, la quantité de chaleur perdue sous l'influence du milieu environnant, est égale à la quantité de chaleur absorbée par suite du rayonnement de la source. Il suffirait donc de déterminer, dans chaque expérience, la quantité de chaleur perdue par le thermomètre pour connaître celle qui est absorbée et pour avoir par suite la valeur du pouvoir absorbant. La question est ramenée à la détermination d'une vitesse de refroidissement.

Pour cela, on intercepte par un écran la chaleur, qui vient de la source ; le thermomètre primitivement recouvert d'une couche mince de la substance qu'on veut etudier se refroidit alors, et on observe quel est l'abaissement de température, au bout de l'unité de temps : soit 0°,30 par exemple. On aura 0,30Q égal à la quantité de chaleur perdue au bout d'un temps 1, si Q désigne la quantité de chaleur, que perd le thermomètre, quand sa température s'abaisse de 1°. On recommence l'expérience, en recouvrant le réservoir du thermomètre avec du noir de fumée ; on fait agir la même source ; puis, quand la température est devenue stationnaire, on intercepte le rayonnement, et on observe la vitesse du refroidissement, soit 0°,40 : on aura 0,40Q pour représenter la quantité de chaleur perdue pendant l'unité de temps. Ces valeurs 0,30Q et 0,40Q expriment aussi les quantités de chaleur absorbées : donc le rapport des pouvoirs absorbants des deux substances sera $\frac{0,30Q}{0,40Q} = \frac{3}{4}$.

550. Détails de la méthode. — Comme nous l'avons remarqué en exposant la loi de Newton (505), l'abaissement de température 0,30 est celui qui convient à un excès intermédiaire entre l'excès initial et l'excès final de la première expérience. Mais, comme nous l'avons dit aussi, un résultat plus exact sera obtenu, si l'on s'arrange de manière que la moyenne de l'excès initial et de l'excès final soit exactement l'excès marqué par le thermomètre, lorsque la température est devenue stationnaire. Dans ce but, il suffit de chauffer un peu la boule et de la porter au-dessus de la température stationnaire. Mais, malgré ces précautions, on n'aura encore qu'une approximation : ce qui est toujours préférable, c'est de faire le calcul mathématique, qui donne exactement la vitesse du refroidissement.

D'autres remarques doivent être faites sur la méthode. Est-il vrai que, la chaleur perdue sous l'influence du milieu environnant soit la même et quand l'écran est placé, et avant qu'il soit interposé? En réalité, ce n'est pas absolument vrai : car, dans l'expérience même, une modification est faite au milieu où le refroidissement s'opère. Il est un côté de l'enceinte, qui se trouve tantôt formé par l'écran, tantôt par la source et qui agit sur le thermomètre, tout différemment. dans les deux phases de l'expérience. Toutefois, ceci n'a qu'une médiocre importance, pourvu que la source soit *vue* du thermomètre sous un très-petit angle. En employant cette méthode, MM. de La Provostaye et P. Desains ont obtenu les résultats suivants :

CHALEUR SOLAIRE.		CHALEUR DE LA LAMPE.	
NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS absorbants.	NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS absorbants.
Blanc de céruse....... ..	0,190	Noir de platine....	1
		Cinabre...	0,285
Or battu en feuilles.......	0,130	Blanc de céruse..........	0,210
		Argent en poudre.........	0,210
Argent en feuilles..	0,075	Or en feuilles............	0,040

IDENTITÉ DE LA CHALEUR RAYONNANTE ET DE LA LUMIÈRE.

551. Récapitulation. — Avant de terminer, récapitulons toutes les analogies, que nous avons reconnues entre la lumière et la chaleur rayonnante :

1° La chaleur comme la lumière se meut en ligne droite et avec une vitesse de même grandeur.

2° La chaleur se réfléchit suivant les mêmes lois que la lumière.

3° La chaleur se réfracte, comme se réfracte la lumière, et se divise comme elle en rayons de diverses espèces.

4° La chaleur se transmet à travers les corps en donnant naissance à des phénomènes tout à fait de même ordre que ceux que présente la lumière.

5° Pour un même rayon incident, formé de lumière simple, les quantités réfléchies varient, quand on modifie les circonstances de la réflexion : et soit que l'on étudie la chaleur ou que l'on étudie la lumière de ce rayon simple, les variations sont identiquement les mêmes.

552. **Expérience de MM. Masson et Jamin.** — Enfin à toutes ces analogies, nous en ajouterons une nouvelle relative à la transmission : les quantités de chaleur et de lumière transmises par une lame transparente, comparées aux quantités qui arrivent sur cette lame donnent exactement les mêmes nombres, pourvu toutefois que l'on opère sur un rayon simple et toujours de même espèce.

MM. Masson et Jamin, après avoir disposé l'appareil de Melloni comme pour une expérience de transmission, placent une lame transparente sur le trajet d'un *rayon simple* du spectre solaire; ils notent la chaleur, qui arrive à la pile. La lame est alors enlevée, la chaleur passe directement, et la déviation du galvanomètre est observée de nouveau. Le rapport des deux nombres obtenus, dans une des expériences faite sur le rayon violet du spectre, fut trouvé égal à 0,44. Pour le même rayon violet on a évalué, et la lumière émergente, et la lumière incidente : le rapport s'est encore trouvé égal à 0,44.

553. **Identité de la chaleur et de la lumière.** — Qu'un spectre soit produit et que l'on étudie un des rayons *simples* qui le composent; que l'on cherche les modifications, que subit ce rayon d'espèce déterminée, soit dans ses propriétés calorifiques, soit dans ses propriétés lumineuses, on reconnait que les deux ordres de propriétés se modifient en même temps et exactement suivant les mêmes lois. Toute cause de réflexion, de transmission, d'absorption qui altère les unes, altère les autres, exactement de même. Si la moitié de la lumière disparaît, la moitié de la chaleur disparaît aussi; si toute la lumière s'éteint, la chaleur s'éteint également. Jamais, quand on s'est adressé à un *rayon simple*, on n'a trouvé une variation de lumière, sans une variation exactement correspondante de chaleur, et les épreuves, on peut le dire, ont été accumulées à l'excès. Une telle concordance de résultats porte à penser, que la chaleur et la lumière font plus que s'accompagner dans le rayon qui agit; qu'elles ne sont peut-être que des manifestations différentes d'un seul et même rayonnement, et la différence des manifestations ne proviendrait pas de deux rayons qui coexistent différents et inséparables, l'un calorifique, l'autre lumineux marchant ensemble; mais résulterait de l'espèce de modification, que peut subir l'objet ou l'être qui se trouve frappé. Sur la vue, ce rayonnement donnerait l'impression de lumière, parce que la vue ne peut éprouver

qu'une sensation lumineuse. Sur le toucher l'impression serait différente, parce que le sens du toucher est doué d'une sensibilité de tout autre nature.

554. **Réponse aux objections.** — Cette assimilation ne laisse pas de présenter un embarras, si, au lieu de se borner à l'étude d'un rayon d'espèce déterminée, on compare les effets des divers rayons du spectre. Il est des rayons, les rayons jaunes, par exemple, qui sont très-lumineux et qui portent avec eux peu de chaleur. Au delà du rouge du spectre, dans la partie qui n'est pas lumineuse, on reconnait cependant qu'un flux de chaleur abondant se propage. Il semble que l'œil devrait voir une vive clarté, si l'on admet notre théorie, là où cependant il ne voit rien.

Ces objections ont embarrassé pendant longtemps et ont empêché de conclure à l'identité des deux rayonnements, malgré toutes les preuves qui la démontraient. Mais il faut remarquer que l'œil, comme tous nos organes, ne doit pas servir d'instrument de mesure à des actions d'espèces différentes ; il peut se faire que sa sensibilité pour les divers rayons ne soit pas la même. Ce que nous disons là n'est pas une simple hypothèse : il n'est pas rare de trouver des individus dont la vue ne perçoit pas ou perçoit mal certaines couleurs, et on en comprend la cause. Ne sait-on pas, en effet, que deux rayons, qui agiraient identiquement avec la même puissance sur un thermomètre recouvert de noir de fumée, produiraient des actions calorifiques bien différentes sur un thermomètre enduit d'un corps, qui absorberait avidement l'un d'eux, et réfléchirait complétement l'autre? N'est-il pas évident que sur la rétine deux rayons doivent aussi agir chacun selon son espèce et chacun selon la nature de la surface qui les reçoit? N'est-il pas évident que, cette sensibilité spéciale qu'un thermomètre accuse pour les divers rayonnements, l'œil doit la posséder doublement? Aux conditions physiques de la sensation se joignent celles qui dépendent du système nerveux.

Quant à ce qui concerne spécialement la chaleur obscure si abondante au delà du rouge, ajoutons que l'œil contient un liquide aqueux qui ne la laisse pas traverser. L'œil ne voit rien dans cette portion du spectre, par cette raison bien simple que rien ou presque rien n'arrive aux parties de l'organe qui ont pour rôle de recevoir la sensation. Cette explication a été mise hors de doute par M. Janssen, qui, étudiant le passage de la chaleur obscure à travers les milieux de l'œil, a reconnu que ces liquides ont arrêté presque tout rayonnement bien avant que la rétine ne fût atteinte.

554 *bis*. **Conclusion.** — Concluons donc que la chaleur rayonnante et la lumière qui se trouvent ensemble dans un rayon homogène ne sont pas deux rayonnements qui cheminent ensemble, et tels que chacun, en arrivant, produit son action propre ; mais bien que toutes deux sont dues à un rayonnement unique qui produit des effets différents, selon l'organe impressionné.

CHAPITRE V

CONDUCTIBILITÉ

555. **Notions préliminaires.** — L'expérience nous a appris que lorsqu'un corps émet de la chaleur, ce ne sont pas seulement les molécules de sa surface extérieure, qui contribuent à la production du phénomène, mais encore les molécules sous-jacentes placées à une profondeur sensible, dans la masse même de la substance. Il a paru bien probable que cette propriété d'un rayonnement particulaire de la chaleur devait appartenir également à toutes les molécules qui forment le corps, aux plus profondes comme aux plus voisines de la surface. Les faits observés s'accordent parfaitement avec cette hypothèse : d'une part, tous les corps de la nature laissent la chaleur se propager dans leur masse, souvent à une assez grande distance des points où ils la reçoivent ; de l'autre, nous montrerons tout à l'heure, qu'en traduisant en calcul cette idée d'un rayonnement de chaleur s'effectuant dans l'intérieur des corps, suivant les mêmes lois qu'à l'extérieur, on est arrivé à des résultats que l'expérience a vérifiés. C'est cette perméabilité intérieure, que les différentes substances possèdent à des degrés différents, qu'on a nommée *conductibilité calorifique.*

CONDUCTIBILITÉ DES CORPS SOLIDES

556. La conductibilité des solides varie beaucoup d'un corps à l'autre. Tandis qu'on peut impunément tenir, entre les doigts, un morceau de bois sec de quelques centimètres de longueur, quoiqu'il soit enflammé à l'une de ses extrémités, on se brûlerait infailliblement, si on saisissait une barre de fer, à une petite distance du point où elle est portée à la chaleur rouge.

557. **Appareil d'Ingenhousz.** — Un appareil dû à Ingenhousz montre clairement l'aptitude inégale des différents corps à laisser la chaleur pénétrer dans leur masse. Il peut même servir à établir une classification des diverses substances, au point de vue de leur conductibilité plus ou moins parfaite. Cet appareil se compose (*fig.* 232) d'une caisse rectangulaire M en métal, dans l'une des parois de laquelle sont implantées des tiges cylindriques de même section *a*, *a*, formées chacune d'une substance différente : l'argent, le cuivre, le fer, l'étain, la porcelaine, le bois, etc. On

commence par plonger toutes ces tiges, à la fois, dans un bain de cire fondue, on les retire ensuite pour les laisser égoutter, de manière à ce qu'il reste après le refroidissement une mince couche de cire à leur surface. Si l'on remplit alors d'eau bouillante la caisse M, on voit la cire fondre peu à peu à la surface des tiges et former finalement un bourrelet extrême, qui indique, par sa position, la distance à laquelle, pour chacune d'elles, la fusion du corps gras s'est opérée. La cire fond sur toute l'étendue de la tige d'argent, dont la longueur est de 15 centimètres, et se conserve à peu près tout entière, à l'état solide, sur la tige de bois; elle fond sur les tiges intermédiaires, à des distances différentes.

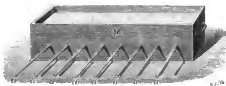


Fig. 232.

L'influence exercée par le rayonnement de la paroi métallique de la caisse ne change pas les résultats, quand on se borne à déduire simplement de l'expérience, la distribution des corps en série, d'après leur plus ou moins grande conductibilité; car cette influence, étant exactement la même sur toutes les tiges, la limite de fusion de la cire ne peut tenir qu'à l'inégalité des pouvoirs conducteurs.

558. **Thermomètre de contact de Fourier.** — La classification qu'on obtient avec l'appareil précédent est très-incomplète : on ne peut pas être renseigné sur la conductibilité des substances qui se présentent en lames minces, comme les tissus de lin, de coton, de laine, de soie, etc. Fourier a comblé cette lacune par l'emploi du thermomètre de contact. Cet instrument consistait en un cône C (*fig.* 233) plein de mercure, fermé à sa partie inférieure par un fragment de vessie et portant à sa partie supérieure la tige d'un thermomètre, dont le réservoir plongeait dans le mercure. Les lames minces qu'on voulait comparer étaient successivement placées, sur une caisse en fonte M, entretenue à une température constante par un courant de vapeur. Sur la lame mise en expérience était ensuite posé le thermomètre de contact. On notait, chaque fois, l'excès de la température stationnaire de l'instrument sur la température constante de l'air extérieur, et comme la chaleur transmise au mercure dans le cône, arrivait presque uniquement par l'intermédiaire de la lame mince, les excès de température ainsi obtenus permettaient de distri-



Fig. 233.

buer les corps en série suivant leur ordre de conductibilité. C'est ainsi que Fourier a constaté que les tissus de lin sont ceux qui conduisent le mieux la chaleur; viennent ensuite ceux de coton, de laine et de soie.

559. **Indications fournies par l'analyse mathématique.** — Les méthodes que nous venons de décrire sont tout à fait insuffisantes pour donner les valeurs exactes des pouvoirs conducteurs. L'analyse mathématique, appliquée par Fourier, est parvenue à indiquer quelles données numériques il fallait demander à l'expérience, pour qu'il fût possible d'obtenir avec exactitude les valeurs cherchées. Voici les principaux résultats du calcul.

Si les différentes substances, dont on veut étudier la conductibilité, sont converties en barres toutes de même forme, de même section et assez minces, pour que, dans les différents points d'une même tranche perpendiculaire à la longueur de la barre, la température puisse être considérée comme étant à chaque instant la même; si ces barres sont assez longues pour que l'une de leurs extrémités, étant maintenue à une température constante, l'autre extrémité de la barre ne reçoive par voie de conductibilité aucune portion de chaleur qui puisse élever sa température au-dessus de celle du milieu ambiant; si enfin toutes les barres ont leur surface recouverte d'un mince enduit, qui communique à toutes le même pouvoir émissif : alors, au moment où l'équilibre calorifique sera établi dans toute l'étendue du corps solide, les excès de la température des différentes sections de chaque barre sur celle du milieu environnant, décroissent en progression géométrique lorsque les distances de ces sections à la source croissent en progression arithmétique. Ainsi, t_1, t_2, t_3 étant les excès de température des tranches placées à des distances 1, 2, 3 de l'extrémité chauffée de la barre, on a :

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{t_2}{t_3} = \frac{t_3}{t_4} = \ldots\ldots \text{ constante,}$$

Fourier a trouvé que l'expression générale de la température d'une section quelconque était

$$t = \mathrm{N}e^{-ax}, \qquad (1)$$

t étant l'*excès* de température d'une section placée à la distance x de la source; N, une constante qui représente la valeur de t pour $x=0$; e^{a} la raison de la progression géométrique pour une même barre, quand on fait successivement $x=1$, $x=2$, $x=3$, etc. Dans ce facteur e^{a}, e est le nombre qui sert de base aux logarithmes népériens, a une quantité constante pour la même barre, variable d'une substance à l'autre, mais d'ailleurs en relation simple, comme nous le verrons tout à l'heure, avec le pouvoir conducteur.

La formule (1) représente bien la loi éuoncée d'abord. ear pour $x=1, x=2, x=3$, on a :

$$t_1 = Ne^{-a},\ t_2 = Ne^{-2a},\ t_3 = Ne^{-3a},$$

d'où

$$\frac{t_1}{t_2} = e^a \quad \frac{t_2}{t_3} = e^a \qquad \text{ou} \qquad \frac{t_1}{t_2} = \frac{t_2}{t_3} = \ldots\ldots \text{ constante.}$$

560. **Expérience de M. Despretz.** — L'indication fouruie par le calcul a été complétement vérifiée par l'expérience. M. Despretz a successivement opéré sur le cuivre, le fer et le zinc, en réalisant le mieux possible les conditions imposées par la théorie. Les barres qu'il a employées avaient 21 millimètres de côté et une longueur telle que la chaleur émanée de la source ne peut arriver jusqu'à l'extrémité opposée; elles étaient toutes recouvertes d'un même vernis, qui leur donnait un pouvoir rayonnant identique. Des cavités ayant une profondeur de 14 millimètres et un diamètre de 6 millimètres, creusées dans toute la longueur de chaque barre à des distances de 10, 20, 30 centimètres de l'extrémité chauffée (*fig.* 234), recevaient quelques gouttes de mercure et dans le mercure de chaque cavité plongeait la petite boule d'un thermomètre très-sensible. — La barre, protégée contre le rayonnement de la source par l'écran E, était ensuite chauffée en F à l'aide d'une lampe, dont la flamme entourée d'une cheminée opaque, était réglée de manière que le thermomètre le plus voisin du foyer indiquât une température constante. On attendait alors que les thermomètres T, T, T″ donnassent une indication stationnaire, ce qui n'arrivait qu'au bout de plusieurs heures; alors on notait les excès de leurs températures sur celle de l'air.

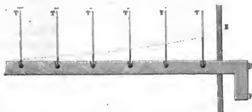


Fig. 234.

561. M. Despretz trouva ainsi que, pour la plupart des substances, la loi se vérifiait. Dans le cas du cuivre en particulier, les excès en question formaient rigoureusement une progression géométrique décroissante, dont la raison était 1,4; pour le plomb et en général pour les métaux qui conduisent la chaleur moins bien que le cuivre, le décroissement des excès stationnaires fut un peu plus rapide que ne l'indique la loi; mais les divergences furent surtout considérables pour les pierres et les bois. C'est que le marbre, la porcelaine, etc. ne remplissent plus les conditions d'homogénéité de nature et de structure que suppose la théorie.

562. **Coefficients de conductibilité. — Leur mesure.** — Le calcul conduit à une autre conséquence importante. Que l'on suppose un mur, formé avec la substance étudiée, d'une épaisseur égale à l'unité de longueur, et dont les deux faces indéfinies et parallèles entre elles soient maintenues à des températures constantes, différant de 1 degré : Fourier imagine dans l'intérieur de ce mur une section parallèle aux deux faces, et y considère une surface égale à l'unité. Il appelle coefficient de conductibilité d'une substance : *La quantité de chaleur qui, dans l'unité de temps, passe à travers cette section.* En adoptant cette définition, la constante a, qui entre dans l'équation (1), se trouve liée par une relation algébrique très-simple avec le coefficient de conductibilité de la substance étudiée. Ainsi, pour une première barre, dont le coefficient de conductibilité est K, si le quotient constant des excès, correspondant à deux sections distantes de l'unité de longueur, est égal à q ; si pour une autre barre de substance différente, dont le coefficient de conductibilité est K', l'on trouve le nombre q' pour le quotient des excès relatifs à deux sections distantes de la même longueur ; le calcul donne entre a, a', K et K' la relation $\frac{K}{K'} = \frac{a'^2}{a^2}$, qui permet d'obtenir immédiatement le rapport $\frac{K}{K'}$ des coefficients de conductibilité des deux corps. En effet, des relations $q = e^a$; $q' = e^{a'}$, nous déduisons :

$$\frac{a'^2}{a^2} = \frac{(\log q')^2}{(\log q)^2} \quad \text{d'où} \quad \frac{K}{K'} = \frac{(\log q')^2}{(\log q)^2}.$$

L'expérience fournit q' et q ; le quotient $\frac{K}{K'}$ peut donc être calculé sans difficulté.

Voici un exemple numérique : dans le cas du cuivre, la raison de la progression a été trouvée égale à 1,40, dans le cas du fer égale à 1,68, quel est le rapport des pouvoirs conducteurs des deux métaux ? on a pour ce rapport :

$$x = \frac{\left(\log (1,68)\right)^2}{\left(\log (1,40)\right)^2} = 2,4.$$

563. **Méthode de MM. Wiedemann et Franz.** — Les progrès, accomplis par les sciences expérimentales, dans ces dernières années, ont permis à MM. Wiedemann et Franz de perfectionner la méthode de M. Despretz. Dans leur procédé, l'extrémité B' de la barre (*fig.* 235) est entretenue à une température parfaitement constante par la vapeur d'eau bouillante, qui circule d'une manière continue dans le manchon C et va se liquéfier ensuite dans un serpentin entouré d'eau froide. La portion B, sur laquelle on étudiera la distribution des températures, est placée dans une enceinte cylin-

drique M où le vide est fait avec la machine pneumatique, par l'intermédiaire du tuyau T'. De cette façon, la barre ne sera que faiblement refroidie

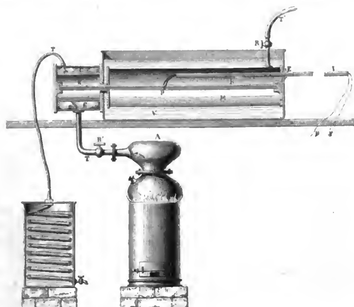


Fig. 235.

par le contact de l'air raréfié; elle n'éprouvera, comme le suppose le calcul, que la perte de chaleur due au rayonnement. En même temps, comme le cylindre M plonge dans la grande masse d'eau froide, que contient le vase V, la température du milieu qui entoure la barre sera constante et exactement connue. Ainsi que l'exige la théorie, les barres employées sont très-minces; leurs surfaces offrent un pouvoir rayonnant toujours identique, parce qu'on a le soin de les recouvrir d'une couche mince d'argent déposée par la méthode galvanoplastique. Enfin, dans ces tiges métalliques, on a évité toute solution partielle de continuité, et leur homogénéité n'est pas en partie détruite, car on mesure les températures, non plus avec des thermomètres à mercure qui pénètrent dans la masse solide, mais avec une pince thermo-électrique P, qui est mobile dans la boîte à étoupe E et qu'un ressort maintient appliquée contre la surface de la tige. Les fils de cuivre F, F' vont aboutir de la pince au galvanomètre; une graduation préalable de cet instrument, faite par comparaison avec un bon thermomètre à mercure, permet de déduire de ses indications les températures des diverses sections de la tige.

564. **Résultats numériques.** — En prenant le pouvoir conducteur de l'argent égal à 1000, MM. Wiedemann et Franz ont obtenu pour les autres métaux :

Cuivre	736
Or	532
Zinc	193
Étain	145
Fer	119
Plomb	85
Platine	84
Bismuth	18

565. **Pouvoirs conducteurs des substances solides usuelles autres que les métaux.** — La connaissance des pouvoirs conducteurs des corps a une grande importance dans beaucoup de questions, qui se rattachent aux applications industrielles de la chaleur. Aussi, s'est-on préoccupé de leur détermination pour la plupart des substances usuelles. Nous ne pouvons indiquer ici que les résultats principaux déduits de l'expérience.

Après les métaux, dont la conductibilité est la plus parfaite, viennent, le marbre, la porcelaine, etc. Le charbon, quand il a subi une calcination longtemps prolongée, peut acquérir une conductibilité comparable à celle du fer : celui que l'on retire des cornues à gaz et qui est actuellement employé dans la construction des piles, est précisément dans ce cas. Les corps d'origine organique et en général toutes les substances non homogènes offrent une conductibilité assez faible; parmi les différents bois, les meilleurs conducteurs sont les bois durs : noyer, chêne, charme, etc.; les plus mauvais conducteurs sont les bois blancs : sapin, peuplier, etc. En outre, la conductibilité dans le sens des fibres est toujours supérieure à celle qui se manifeste dans un sens perpendiculaire. Enfin, les corps appartenant à une substance conductrice quelconque présentent toujours un pouvoir conducteur beaucoup plus petit, lorsqu'on les emploie sous la forme de poudre. Un excellent moyen pour empêcher la chaleur de pénétrer dans une enceinte consiste à entourer celle-ci d'une double cloison en planches de sapin ou de peuplier et de remplir l'intervalle, qui sépare les deux parois, avec des substances pulvérulentes : la paille hachée, la sciure de bois, le charbon en poudre.

566. **Propagation de la chaleur dans les cristaux.** — Quoique la densité soit la même aux différents points d'un même cristal, cependant comme la dilatabilité par l'action de la chaleur (280) et l'élasticité sont en général variables autour d'un point suivant la direction qu'on choisit, il était probable que la propagation de la chaleur s'effectuerait aussi d'une manière différente. M. de Sénarmont a mis ce résultat en évidence par un procédé très-ingénieux : nous ne citerons ici qu'une seule de ses expériences. Au milieu d'une lame mince de spath d'Islande L (*fig.* 236), on pra-

tique un trou d'un quart de millimètre de diamètre. A travers ce trou, passe un fil de platine F, qu'on fait rougir, en le mettant en communication avec les deux pôles d'une pile : le fil représente la source de chaleur qui échauffera les bords de l'orifice. Or, si la lame de spath, rendue d'abord horizontale, est recouverte d'une mince couche de cire, le corps gras fond tout autour du fil et le bourrelet de cire indique la limite de la fusion. Dans le cas, où la lame est taillée perpendiculairement à l'axe, ce bourrelet décrit une circonférence de cercle ayant pour centre le petit orifice : ici, tout est symétrique autour de l'axe de cristal, et la chaleur se propage également dans toutes les directions. Si la même expérience est répétée avec une lame de spath, taillée obliquement par rapport à l'axe, la ligne limite tracée, cette fois, par la cire fondue devient une ellipse. L'inégalité des pouvoirs conducteurs dans les différentes directions est ainsi rendue manifeste.

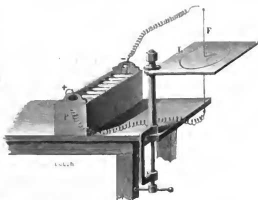


Fig. 236.

CONDUCTIBILITÉ DES LIQUIDES.

567. **Échauffement d'une colonne liquide par la partie inférieure.** — Pour prouver que les liquides conduisent la chaleur, on ne saurait les chauffer par leur partie inférieure ; car la portion de la masse qui s'échauffe la première, celle qui est en contact avec le fond du vase, devient moins dense, et s'élève vers la région supérieure, en même temps que les couches plus froides descendent pour la remplacer. Il s'établit donc nécessairement, dans tout vase contenant un liquide, qu'on chauffe par le bas, un double courant, qui mélange entre elles les différentes couches et la chaleur ainsi propagée dans la masse est due plutôt à un phénomène de contact qu'à la conductibilité propre de la substance. On peut rendre visible ce double courant, en mélangeant avec l'eau une matière de densité à peu près égale à celle du liquide, la sciure de bois. En chauffant cette eau dans un vase de verre, à l'aide d'un foyer ordinaire, on aperçoit un courant ascendant suivant l'axe du vase et un courant descendant le long des parois.

568. **Échauffement d'une colonne liquide par la partie supérieure. — Expérience de J. Murray.** — Si l'on échauffe la colonne liquide par la partie supérieure, en enflammant par exemple de l'éther, placé sur l'eau qui remplit une éprouvette à pied, on constate que la chaleur pénètre peu à peu à une certaine profondeur au-dessous de la couche chauffée par contact; un thermomètre, dont la tige traverse la paroi latérale de l'éprouvette et dont la boule est placée sur l'axe du cylindre, à quelques centimètres au-dessous de la couche d'éther, accuse une élévation sensible de température. Mais, la conséquence déduite de ce résultat peut être contestée : la chaleur ne s'est-elle pas transmise dans le liquide à la faveur de la paroi de l'éprouvette, ou bien, ne s'est-elle pas transmise à travers le liquide jusqu'au thermomètre, par rayonnement direct? Une expérience de J. Murray lève toute difficulté sur le premier point. Il creusa dans un bloc de glace G (*fig.* 237) une cavité cylindrique qu'il remplit d'eau à 0°; il fixa un thermomètre T dans la paroi, comme l'indique la figure, et il prit, comme source de chaleur, un vase de cuivre V plein d'eau chaude et dont le fond horizontal était en contact avec la surface de l'eau à 0°. Puisque le thermomètre indique encore, cette fois, une élévation notable de température, puisque nous savons, d'autre part, que la chaleur, reçue par la glace, peut la fondre en partie, mais non en élever la température au-dessus de 0°, il est évident qu'on ne peut plus attribuer l'échauffement du thermomètre à la conductibilité de la paroi solide; en outre, la source émettant de la chaleur obscure, l'échauffement du thermomètre ne pouvait pas être dû à la diathermanéité du liquide. Il faut donc admettre que les liquides, en général, conduisent la chaleur à la façon des corps solides; mais leur pouvoir conducteur est beaucoup plus faible que celui des métaux.

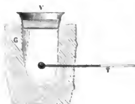


Fig. 237.

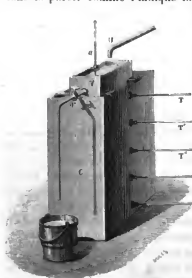


Fig. 238.

569. **Expériences de M. Despretz.** — M. Despretz est entré plus avant

dans la question : il a cherché si la loi de propagation de la chaleur dans une colonne liquide était la même, que dans une barre solide homogène. A cet effet, il remplissait d'eau un grand vase de bois (*fig.* 238), implantait horizontalement des thermomètres T, T′, T″ dans la paroi, de manière que leurs réservoirs fussent placés dans l'axe du vase cylindrique ou prismatique, à des distances variant en progression arithmétique; enfin, il prenait, comme source de chaleur un vase métallique V, à parois minces, dans lequel il renouvelait l'eau chaude, toutes les cinq minutes, à l'aide des tubes U et U′. Par ce procédé, la source pouvait être considérée comme constante. Pour que la chaleur dégagée par l'eau chaude et par sa vapeur ne fît pas varier la température de l'air qui entourait l'appareil, le tube U amenait l'eau d'alimentation d'une chambre voisine. Il fallait 30 heures pour que les thermomètres donnassent des excès stationnaires de température. N'oublions pas de faire observer que dans l'appareil de M. Despretz, la paroi du vase conduisant très-mal la chaleur, la transmission de celle-ci à une assez grande distance de la source ne pouvait avoir d'autre cause que la conductibilité de l'eau.

M. Despretz reconnut que ces excès décroissaient en progression géométrique comme dans le cas des solides. Dans le cas particulier de l'eau, la raison de la progression était 1,6, pour une distance des deux thermomètres consécutifs égale à 45 millimètres.

Le mercure est, parmi les liquides, celui dont le pouvoir conducteur est le plus grand.

CONDUCTIBILITÉ DES GAZ.

570. **Difficultés qui se présentent dans l'étude de la conductibilité des gaz.** — Ce n'est pas chose facile que de décider, par la voie de l'expérience, si les gaz conduisent ou non la chaleur : la grande mobilité de leurs molécules, les variations des forces élastiques, dues aux changements de température, amènent forcément des courants, qui mélangent les couches entre elles et transmettent, par contact, la chaleur de l'une à l'autre. On aura beau chauffer par la partie supérieure le vase qui contient le gaz, on ne sera pas plus heureux : le rayonnement de la partie du vase soumise à l'action d'un foyer de chaleur échauffe soit la paroi latérale, soit la paroi inférieure, et les courants gazeux s'établissent nécessairement. Il serait, d'ailleurs, fort inexact de déterminer dans ce cas la distribution des températures dans la colonne gazeuse, à l'aide de thermomètres à mercure, qu'on plongerait dans les diverses tranches ; car ces thermomètres s'échaufferaient principalement par l'absorption directe de la chaleur que rayonnerait la source employée.

571. **Imparfaite conductibilité des gaz.** — Ce qu'on peut affirmer néanmoins en toute sécurité, c'est que si les gaz conduisent la chaleur, ils la conduisent très-mal. Tout système de corps, qui renferme, entre les diverses parties qui le constituent, une grande masse d'air, possède par cela seul une conductibilité très-imparfaite, surtout quand cet air est gêné dans ses mouvements. Le duvet, le coton cardé, les fourrures et en général toutes les substances filamenteuses, qui emprisonnent l'air entre leurs fibres, sont de très-mauvais conducteurs de la chaleur. Aussi les emploie-t-on avec beaucoup de succès pour se garantir du froid pendant l'hiver. Les tissus de laine fournissent des vêtements chauds parce qu'ils empêchent la déperdition, à l'extérieur, de la chaleur qui se développe sans cesse dans nos organes. Il est certain qu'ils doivent surtout cette propriété à ce que les filaments de la laine, plus difficiles à assouplir que ceux du lin ou du chanvre, ne peuvent pas donner des tissus bien unis, et retiennent une multitude de petites bulles gazeuses. Ces mêmes tissus servant d'enveloppe à un bloc de glace, en ralentissent la fusion pour le même motif, lorsqu'on place le bloc dans un milieu, dont la température est supérieure à 0°. Les doubles fenêtres garantissent très-bien, en hiver, les appartements contre un refroidissement trop rapide, à cause de la lame d'air interposée entre les carreaux de vitre. Cet air n'empêche pas l'introduction dans la pièce de la chaleur solaire, parce qu'il est diathermane pour les rayons de haute température, tandis qu'il s'oppose au départ de la chaleur obscure, soit par voie de transmission directe, soit par voie de conductibilité.

CHAPITRE VI

APPLICATIONS

SECTION I

Machines à vapeur.

DES PREMIÈRES MACHINES A VAPEUR.

572. **Papin.** — Dès que l'expérience de Torricelli exécutée en 1642 eut montré la possibilité de faire le vide et qu'Otto de Guericke eut mis en évidence, par des expériences célèbres, les effets puissants que la pression

atmosphérique peut exercer, une idée s'empara de Papin : il voulut utiliser cette pression pour faire mouvoir les machines. Préoccupé de cette idée, il s'ingénia à trouver des moyens de faire le vide ; mais il se garda bien d'imiter ceux qui, poursuivant le même dessein, employaient les forces déjà connues et ne faisaient de la machine pneumatique qu'un intermédiaire, consommant en pure perte une partie du travail moteur. La question que s'est posée Papin est celle du vide obtenu par des procédés nouveaux, par des procédés tels qu'il ne fût nécessaire de recourir à aucune des forces mécaniques alors en usage. A la suite d'un grand nombre d'essais, il reconnut que le meilleur moyen de résoudre le problème consistait à utiliser la propriété, que la vapeur d'eau possède, de revenir à l'état liquide par le refroidissement et de laisser vide ou presque vide tout l'espace qu'elle occupait d'abord.

573. **Machine de Papin.** — L'idée de Papin consistait donc à prendre un corps de pompe C (*fig.* 239), fermé à sa partie inférieure, et au fond duquel se trouvait un peu d'eau; immédiatement au-dessus de l'eau était un piston P. Si le feu est allumé sous le corps de pompe, l'eau s'échauffe, entre en vapeur ; la force élastique de la vapeur équilibre la pression atmosphérique, et si la température s'élève jusqu'à 100°, le moindre effort suffira pour lever le piston. Qu'à ce moment on refroidisse le corps de pompe, la vapeur se condensera et la pression atmosphérique n'étant plus combattue, agira seule; le piston, mis en mouvement par cette action, s'enfoncera dans le corps de pompe et pourra vaincre une force F qui s'opposerait à sa descente. En chauffant de nouveau le corps de pompe pour le refroidir ensuite, on produira un mouvement alternatif.

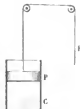


Fig. 239.

574. **Machine de Cawley, Newcomen et Savery.** — La machine de Papin ne reçut aucune application immédiate. Cawley, Newcomen et Savery furent les premiers qui construisirent pour l'industrie une machine tout à fait semblable à celle de Papin, mais avant de l'employer ils y introduisirent un perfectionnement important. Une chaudière G (*fig.* 240), séparée du corps de pompe C et chauffée par un feu continu, tenait toujours de la vapeur prête à remplir le corps de pompe ; un tuyau à robinet V servait à faire passer à volonté la vapeur sous le piston. Ce perfectionnement était considérable : il économisait tout le temps perdu avec la machine de Papin, pour chauffer l'eau et la réduire en vapeur à la suite de chaque coup de piston.

La tige du piston s'adaptait au moyen d'une chaine à l'extrémité L' d'un balancier LL', qui oscillait autour d'un axe O. A l'extrémité L s'attachait une chaine chargée de poids unie à la tige maîtresse M d'une pompe des-

tinée à épuiser l'eau qui envahissait les galeries des mines. Lorsque la vapeur se condensait par suite du refroidissement du corps de pompe, le piston descendait entraînant le balancier, et la tige de la pompe était sou-

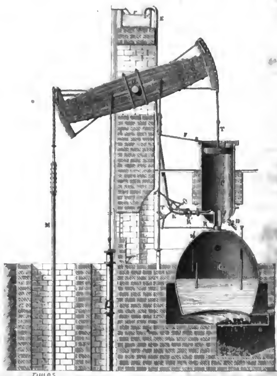


Fig. 240.

levée. Quand la communication avec la chaudière avait été rétablie et que la vapeur parvenait dans le corps de pompe, les poids dont la chaîne se trouvait chargée forçaient le piston à monter et la tige de la pompe s'abaissait.

575. **Perfectionnements.** — Un hasard heureux amena un perfectionnement utile. Un jour que le piston fermait mal le corps de pompe, on le recouvrit d'une couche d'eau dont les gouttelettes tombèrent dans le compartiment inférieur de ce corps de pompe, la machine marcha mieux que jamais. Après examen, on vit que l'amélioration tenait à la condensation de la vapeur, qui se faisait plus rapidement par l'introduction des gouttelettes d'eau froide. Dès lors on ne produisit plus la

condensation en refroidissant extérieurement le corps de pompe, mais bien par une injection d'eau froide opérée à l'intérieur. La figure montre la position et la forme du réservoir d'eau froide *r*, et celle du tube injecteur E muni d'un robinet R'.

Un nouveau perfectionnement fut apporté à la machine par un enfant, nommé Potter, qui était chargé d'ouvrir et de fermer aux moments convenables les robinets R et R'. Fatigué d'une pareille contrainte, et voulant jouer avec ses camarades, Potter attacha des ficelles, qui allaient du balancier aux robinets, et le fit d'une manière si ingénieuse, que les robinets s'ouvrirent et se refermèrent désormais en temps utile par le jeu même de la machine.

L'appareil ainsi perfectionné fut employé à extraire l'eau qui envahissait les mines de charbon de terre et s'opposait souvent à la continuation des travaux : on dépensait une partie du produit pour ne pas le perdre tout entier. Il est remarquable que l'extraction de la houille ait donné lieu à l'invention de cette machine, qui la consomme aujourd'hui par milliers de tonnes.

MACHINES PERFECTIONNÉES PAR WATT.

576. **Watt.** — Peu après l'époque où la découverte de Papin était l'objet des perfectionnements importants que nous venons de rappeler, Watt, attaché à l'Université de Glascow pour la réparation des instruments de physique, fut chargé de mettre en état un modèle de la machine de Newcomen, qui n'avait jamais pu fonctionner convenablement. Watt s'intéressa à son travail, et introduisit dans cette machine plusieurs modifications heureuses. C'est de ce moment que datent les immenses progrès de l'industrie. La machine à vapeur n'a plus été réduite à faire manœuvrer seulement les pompes, elle est devenue un ouvrier universel, capable tout aussi bien de travailler les métaux les plus durs que de tisser les plus fines étoffes.

577. **Condenseur.** — Le premier perfectionnement de Watt consiste dans l'invention du condenseur. Il trouva moyen de liquéfier la vapeur dans un vase séparé C' (*fig.* 241), et d'éviter ainsi le refroidissement du corps de pompe. Ce simple changement rendit beaucoup moindre la dépense de chaleur; on économisa toute celle qui était destinée à réchauffer le corps de pompe, alors que le piston descendu au plus bas point de sa course devait être ramené au point le plus élevé.

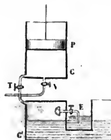


Fig. 241.

Dans ce condenseur, arrive, par un tuyau E terminé en pomme d'arro-

soir, l'eau froide d'un grand réservoir. On sait que, d'après le principe de Watt (377), la vapeur contenue dans le corps de pompe doit venir, dans ces conditions, se liquéfier presque tout entière dans le condenseur refroidi, et que la force élastique de celle qui reste, correspondra à la tem-

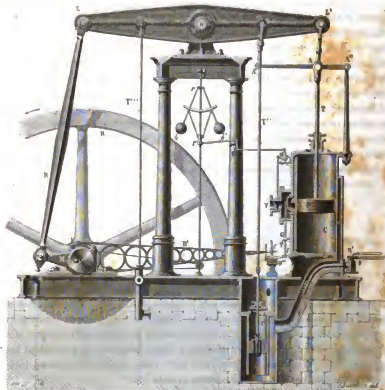


Fig. 242.

C cylindre à vapeur. — P piston. — T tige du piston. — LL' balancier. — B bielle. — M manivelle. — R volant qui régularise le mouvement de la machine. — K collier de l'excentrique. — B' barre de l'excentrique qui agit sur le levier ll' et met en mouvement le tiroir. — T' tige de la pompe à air. — T''' tige de la pompe alimentaire. — e chemise du corps de pompe. — C' condenseur qui reçoit l'eau froide venant par le tuyau F. — AA'A''A''' parallélogramme articulé auquel s'attache la tige du piston et qui force cette tige à se mouvoir verticalement. — A'A''' levier situé derrière le parallélogramme et articulé au point fixe A''' et à l'angle A' — $rbb'r'$ parallélogramme à force centrifuge dont les boules s'élèvent quand la machine prend un mouvement rapide. — V valve qui se ferme en partie quand par l'élévation des boules le point r' monte.

pérature de l'eau froide, c'est-à-dire à 3 centimètres environ, si la température de cette eau est 30°.

578. **Accessoires**. — Ce condenseur exige une série d'appareils accessoires. Une pompe aspirante est nécessaire pour extraire l'eau du conden-

seur à mesure qu'elle s'échauffe : elle se trouve représentée sur la figure 242 et le balancier en fait mouvoir la tige T''. Cette pompe sert aussi à extraire l'air, qui se dégage de l'eau introduite dans le condenseur et qui ne tarderait pas à arrêter le mouvement du piston, s'il s'accumulait en trop grande quantité : à cause de cette dernière fonction, elle a reçu le nom de *pompe à air*. Il faut qu'une autre pompe emplisse continuellement d'eau froide le réservoir, qui alimente le condenseur, à moins qu'un réservoir naturel ne donne constamment de l'eau, sans qu'il soit nécessaire de recourir à un moteur spécial. La machine représentée par la figure 242 est dans le dernier cas que nous venons de signaler. Le tuyau horizontal F se recourbe, descend et plonge dans de l'eau dont le niveau est élevé : le robinet R' étant ouvert, la pression atmosphérique chasse l'eau qui jaillit dans le condenseur. Enfin une dernière pompe, dont la tige T''' s'articule au balancier, est destinée à prendre une partie de l'eau chaude extraite du condenseur et à renvoyer cette eau dans la chaudière pour l'alimenter.

579. **Machine à double effet.** — Watt, à la suite de ces premiers essais, ne tarda pas à transformer totalement l'idée des premiers inventeurs. Papin avait voulu utiliser la pression atmosphérique, Watt n'eut plus recours qu'à la vapeur : il ferma le corps de pompe en haut comme en bas (*fig.* 242 *et* 243), et introduisit la vapeur alternativement au-dessus et au-dessous du piston. Dans ces nouvelles machines, quand la vapeur entre par le conduit I (*fig.* 243), sous la tête du piston, et le pousse vers le haut, une communication s'établit entre la partie supérieure du corps de pompe et le condenseur C'; semblablement, quand le piston est au plus haut point de sa course, C' communique avec le compartiment inférieur du corps de pompe, et la vapeur qui arrive par I' au-dessus du piston lui imprime un mouvement descendant. Le piston acquiert donc son mouvement de va-et-vient par l'action de la vapeur dont la force élastique s'exerce successivement sur ses deux faces : c'est pour ce motif que cette machine est dite *à double effet*. Le but principal de Watt, en imaginant ce dernier perfectionnement, avait été de soustraire aussi complétement que possible le corps de pompe à toute influence capable d'abaisser sa température. Dans les machines à simple effet, l'air froid, en s'engouffrant derrière le piston, refroidissait les parois du cylindre : cet inconvénient n'est plus à redouter dans la machine à double effet.

Mais l'importance de cette double action de la vapeur est considérable à d'autres points de vue : 1° le mouvement de la machine se divise en deux temps identiques entre eux, ce qui permet un travail sans intermittence; 2° on peut faire agir la vapeur sous des pressions de 2, de 5 et même de 10 atmosphères, et donner à la machine une puissance nouvelle sans en agrandir les dimensions ; 3° dans ces conditions de pres-

sion, la détente de la vapeur (586) produit des économies considérables.

580. **Chemise du corps de pompe.** — Enfin, pour préserver encore mieux le corps de pompe contre le refroidissement, Watt l'enveloppe d'un cylindre *e* (*fig.* 242) un peu plus large, dans lequel il fait circuler de la vapeur avant qu'elle entre ou qu'elle sorte.

581. **Machines à haute et à moyenne pression.** — Dès que Watt n'utilisa plus la pression atmosphérique, pour faire mouvoir le piston, il n'y eut plus de raison pour ne faire agir la vapeur qu'à une pression à peu près égale à la pression atmosphérique; on rendit peu à peu sa force élastique de plus en plus grande, et on la porta successivement à 2, 3, 4, 5, 6, 7, même jusqu'à 10 atmosphères. Ces pressions sont faciles à atteindre, car elles se produisent à des températures, qui ne sont pas très-supérieures à 100°; déjà à 145°, la pression atteint 4 atmosphères, et à 172° elle monte jusqu'à 8 atmosphères. Par ces fortes pressions, l'action, exercée sur la tête du piston, devient considérable et l'on peut, avec des machines de petites dimensions, obtenir des effets très-puissants. Mais quelque avantage que présentent les hautes pressions, dans la pratique on ne dépasse guère 7 atmosphères ; au delà, il devient presque impossible d'éviter les fuites de vapeur, la construction de la machine est plus coûteuse, les réparations sont plus fréquentes et les explosions surtout sont plus terribles.

582. D'après la tension de la vapeur que les machines emploient, elles ont été partagées en trois classes :

1° Les machines *à basse pression :* ce sont celles, dans lesquelles la vapeur n'atteint pas une pression de beaucoup supérieure à la pression atmosphérique;

2° Les machines *à moyenne pression*, qui marchent sous une pression de la vapeur ne dépassant pas 4 atmosphères ;

3° Enfin les machines *à haute pression*, dans lesquelles la pression de la vapeur est supérieure à 4 atmosphères.

Ces diverses espèces de machines sont employées suivant les circonstances. Les machines des bateaux à vapeur marchent à moyenne pression : ici les explosions sont fatales, il faut faire des sacrifices pour assurer la sécurité. Les machines que l'industrie emploie sont aussi d'habitude à moyenne pression. Quant aux locomotives où le piston doit acquérir une grande vitesse pour imprimer au convoi une marche rapide, et dont le volume et le poids sont nécessairement limités, elles fonctionnent à haute pression.

583. **Bielle et manivelle.** — Aux transformations indiquées (577 et 579) et à l'aide desquelles Watt avait voulu surtout éviter les pertes dues au refroidissement, le célèbre mécanicien anglais en ajouta une autre qui permit d'employer la machine non plus seulement à élever l'eau par le jeu d'une pompe, mais encore à exécuter toute espèce de travail. Il arriva

à ce résultat important en transformant le mouvement de va-et-vient du balancier en un mouvement de rotation. Comme l'eau, le vent, les animaux sont employés depuis des siècles à produire ce dernier mouvement, les moyens destinés à l'utiliser pour l'exécution des divers travaux de l'industrie sont depuis longtemps connus.

Watt parvint à son but en articulant à l'extrémité L (*fig.* 242) du balancier une bielle B, que l'on peut comparer à un puissant bras de fer de forme invariable, qui saisit le bouton d'une manivelle M. Quand l'extrémité de la bielle se lève, la manivelle tourne comme si elle était soulevée par la main d'un ouvrier; elle descend ensuite avec la bielle, et en définitive le mouvement s'exécute exactement comme celui d'une manivelle ordinaire sur laquelle la main d'un ouvrier exercerait une pression continue. La manivelle entraîne un arbre tournant nommé arbre de couche, sur lequel on prend les mouvements dont on a besoin.

584. **Tiroir.** — La suite de la description de la machine va nous fournir un exemple assez intéressant des divers mouvements que l'on peut produire au moyen du mouvement de rotation imprimé à l'arbre de couche. Cet exemple, nous le trouvons dans la description du mécanisme par lequel la vapeur pénètre, soit de la chandière dans le corps de pompe, soit du corps de pompe dans le condenseur.

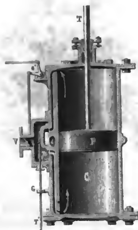


Fig. 243.

Aux robinets que le jeune Potter avait si ingénieusement fait tourner par la machine même, Watt substitua un nouvel appareil : le *tiroir;* mais la leçon que l'enfant avait donnée ne fut pas perdue, et Watt employa aussi la machine à mettre le tiroir en mouvement. Une boite (*fig.* 243), qu'on appelle *boîte à vapeur*, reçoit la vapeur par un tube qui communique avec la chaudière et aboutit en V : deux conduits I et I' partent du fond de la boite et l'un I communique avec la partie inférieure du corps de pompe, l'autre I' avec la partie supérieure. Une plaque *p*, qui constitue le tiroir, ferme alternativement l'ouverture, soit de l'un, soit de l'autre conduit, et la vapeur qui est dans la boîte ne peut jamais pénétrer à un moment donné que dans un seul des compartiments du corps de pompe. Dans les figures 242 et 243 le tiroir occupe la position qui convient à l'arrivée de la vapeur au-dessous du piston. Mais quand la vapeur venant de la chaudière entre d'un côté, il est nécessaire que celle qui se trouve de l'autre vienne se liquéfier dans le condenseur. La communication avec le condenseur

s'établit alors par une cavité qui est pratiquée sur l'une des faces de la plaque *p* dont la forme présente alors une analogie éloignée avec celle d'une coquille : d'où le nom de *tiroir en coquille*. Par cette cavité, la vapeur qui est au-dessous du piston communique avec l'ouverture *e* (*fig.* 243) d'un tuyau qui se rend au condenseur. Que la machine donne maintenant au tiroir un mouvement alternatif, les ouvertures des tuyaux I et I′ seront successivement découvertes en temps utile pour que la distribution puisse se faire comme il a été dit plus haut.

585. **Excentrique.** — Le tiroir emprunte son mouvement de va-et-vient à l'arbre tournant : on emploie à cet usage une pièce E que l'on appelle *excentrique* (*fig.* 242 et 244). C'est un disque circulaire E fixé perpendicu-

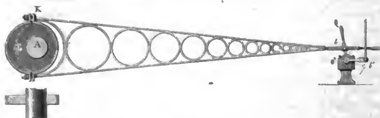


Fig. 244.

lairement à l'arbre, de telle sorte que le centre du disque ne coïncide pas avec l'axe même de rotation. Autour de lui est un collier métallique K qui le serre, mais assez doucement pour que l'un puisse tourner dans l'autre. A ce collier est fixée une tige K*l* appelée *barre de l'excentrique*, qui s'articule avec l'une des extrémités *l* d'un levier coudé *ll*′ qui directement ou par un levier intermédiaire fait mouvoir la tige T′ (*fig.* 242) du tiroir.

La rotation de l'arbre tournant détermine le mouvement de l'excentrique dont le collier fixé à la tige K*l* (*fig.* 244) ne peut pas tourner. Mais comme le spectateur, qui mettrait son œil à l'un des bouts de l'axe et regarderait dans la direction de cet axe, verrait l'excentrique devenir plus proéminent, tantôt à droite, tantôt à gauche du point A, il en résulte que le collier de l'excentrique avance dans un sens, puis recule, et que la barre prend un mouvement oscillatoire de va-et-vient, qu'elle transmet au levier auquel elle s'articule; puis ce mouvement se communique à la tige du tiroir, qui lui-même prend son mouvement alternatif aux époques voulues.

586. **Détente de la vapeur.** — Depuis Watt la machine a reçu un perfectionnement auquel notre inventeur avait pensé, mais sans s'y arrêter. Au lieu de laisser la vapeur pénétrer de la chaudière dans le corps de pompe, pendant toute la course du piston, on trouve avantageux d'intercepter l'entrée de la vapeur, quand le piston n'a exécuté encore qu'une partie de sa course, la moitié, le quart, ou moins encore. La vapeur antérieurement

introduite continue le mouvement du piston, en vertu de sa force élastique ; toutefois cette force élastique diminue à mesure que la détente s'opère, et la puissance qui agit va sans cesse en décroissant. L'effet produit est moindre, il est vrai, que si la vapeur avait continué à pénétrer dans le corps de pompe ; mais il se trouve du moins obtenu sans dépense, puisqu'il n'a pas été nécessaire d'introduire de nouvelle vapeur dans l'intérieur du corps de pompe. Au point de vue économique, c'est un avantage sur lequel il n'est pas nécessaire d'insister.

Beaucoup de machines portent un mécanisme qui permet de faire varier la détente suivant les besoins du travail. Si à un moment le travail est rude, la machine fonctionne à pleine vapeur ; si au contraire plusieurs des outils sont au repos, le tiroir est disposé pour que la vapeur agisse avec la détente qui convient.

587. **Machine sans condenseur.** — Le condenseur, nous l'avons vu, entraîne des complications dans le mécanisme, il exige des réservoirs, plusieurs pompes, et l'ensemble de tous ces accessoires prend une place

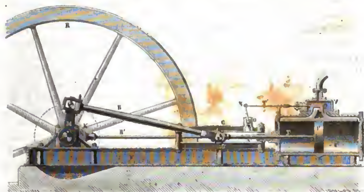


Fig. 245.

C cylindre à vapeur. — P piston. — T tige du piston maintenue par les guides G, G. — B bielle qui met en mouvement la manivelle M et par suite le volant R. — V boîte à vapeur dans laquelle se tient le tiroir Q. — E excentrique dont la barre B' s'articule en levier NN', et fait mouvoir la plaque du tiroir.

considérable, occasionne de grands frais d'installation et d'entretien ; en outre, le travail des pompes et particulièrement celui de la pompe à air, absorbe une fraction notable de l'effet utile. Pour ces raisons et malgré l'économie donnée par le condenseur, il est souvent préférable de le supprimer ; et la suppression est possible dans les machines à moyenne et à haute pression. Dans celles où le condenseur n'est pas employé (*fig.* 245), la vapeur, après avoir agi, est mise par l'ouverture *e* (*fig.* 243) en communication di-

recte avec l'atmosphère; elle s'y répand, et ne conserve plus qu'une force élastique égale à celle de l'air extérieur. Le piston se meut dès lors par la différence des pressions exercées sur ses deux faces, et une partie du travail de la machine est perdue par la résistance due à la pression atmosphérique qui persiste ; mais la perte est compensée par les avantages que nous avons signalés.

La figure 245 représente une machine horizontale des plus simples : la légende en explique les différentes pièces.

588. **Classification des machines.** — La détente et la condensation ont une telle importance qu'elles sont employées comme les caractères principaux, qui servent à classer les machines. D'après cela, on en distingue quatre espèces :

1° Machines sans détente et sans condensation ;

2° Machines sans détente et à condensation ;

3° Machines à détente et sans condensation ;

4° Machines à détente et à condensation.

Les premières donnent le moins d'effet utile; les dernières emploient la chaleur dépensée mieux que toute autre.

589. **Chaudières des machines à vapeur.** — La construction des chaudières, employées pour les machines à vapeur, est d'une grande importance, et Watt ne pouvait manquer de porter son attention sur ce sujet. Il comprit qu'à toutes les économies, qu'il avait faites par une heureuse entente des conditions où la machine fonctionne, il fallait encore en ajouter de nouvelles et produire la vapeur à bon marché. Il construisit des chaudières qui ont été très-employées, mais qui sont remplacées par celles de Woulff, dites *chaudières à bouilleurs*.

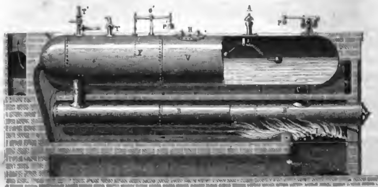


Fig. 246.

590. **Chaudières à bouilleurs.** — Une chaudière à bouilleurs (*fig.* 246

et 247) est formée de trois cylindres : le premier V, le plus large, constitue la chaudière proprement dite ; les deux autres B et B' sont les bouilleurs, qui, placés au-dessous de la chaudière, se relient à elle par des tuyaux assez courts C, C'. Le tout est engagé dans un fourneau dont G représente la grille. Trois cloisons partagent le fourneau dans sa longueur : la première horizontale au-dessus des bouilleurs le divise en deux étages ; les deux autres cloisons verticales passent le long de la ligne des bouilleurs et divisent l'étage supérieur en trois compartiments, dont deux K et K' placés latéralement ont reçu le nom de *carneaux ;* ces derniers communiquent avec le corps de la cheminée. La flamme du foyer et la fumée traversent toute la longueur de l'étage inférieur I et passent autour des bouilleurs ; au bout du fourneau, la fumée trouve une ouverture par laquelle elle peut se rendre dans le compartiment M ; elle chemine alors sous la chaudière, puis, arrivée au bout de ce compartiment, elle trouve une communication avec les deux carneaux K et K', avance le long des parois de la chaudière, et enfin s'échappe par la cheminée. La fumée parcourt donc trois fois la longueur du fourneau, en se tenant toujours en contact avec les parois de la chaudière qu'il faut échauffer : elle arrive dans l'atmosphère après qu'une partie considérable de sa chaleur a été mise à profit.



Fig. 247.

591. **Manomètre.** — A la paroi de la chaudière est adapté un tuyau, qui communique avec un manomètre destiné à donner la pression de la vapeur et à indiquer au chauffeur s'il doit augmenter ou diminuer le feu afin que la vapeur soit dans les conditions de tension qui conviennent à la marche de la machine.

592. **Appareil à niveau d'eau. Sifflet d'alarme.** — Divers systèmes indiquent au chauffeur la hauteur de l'eau que la chaudière contient et l'avertissent d'en faire parvenir, quand le niveau s'est trop abaissé. Le procédé le plus simple consiste à adapter un tube vertical de verre, qui, au moyen de garnitures convenables, communique par le bas et par le haut avec la chaudière, et forme avec elle un système de vases communiquants : l'eau se tient au même niveau dans ces deux vases, et le chauffeur voit, à travers la paroi de verre, jusqu'à quelle hauteur le liquide s'élève.

Voici un autre système : un flotteur F (*fig.* 245) attaché par un fil à l'extrémité d'un levier et équilibré en partie par un poids P' indique le niveau de l'eau. Quand le niveau baisse, le flotteur descend et le levier s'incline.

Pour avertir le chauffeur négligent et le forcer à remettre de l'eau dans la chaudière, on s'est arrangé de manière que la vapeur s'échappe et fasse

résonner un *sifflet d'alarme* quand le niveau est descendu trop bas : le sifflet est placé en A ; au-dessous, un tube fixé à la chaudière est fermé par une soupape conique ; une boule creuse et de grandes dimensions dont le poids est à peu près équilibré par une petite boule massive qui s'adapte à un levier soutient la soupape conique, et ce levier est lui-même mobile autour d'un point fixe. Quand l'eau atteint la hauteur suffisante, la poussée du liquide s'exerce sur la boule creuse qu'elle tient soulevée, et la soupape ferme le tube. Mais si l'eau descend par trop, la boule creuse n'étant plus complétement équilibrée, s'abaisse ; la soupape s'ouvre, la vapeur sort, et le bruit du sifflet se fait entendre.

593. **Soupape de sûreté.** — Pour permettre à la vapeur de sortir quand elle acquiert une tension plus grande que celle qui convient, on perce dans la paroi de la chaudière une ouverture fermée par une soupape, sur laquelle appuie un levier chargé d'un poids P' (*fig.* 246). Ce levier mobile autour du point O se lève avant que la tension de la vapeur devienne assez forte pour que la limite de la résistance offerte par les parois de la chaudière soit atteinte. L'invention de la soupape de sûreté est due à Papin.

594. **Autres pièces de la chaudière.** — Le tuyau T' sert à conduire l'eau nécessaire pour l'alimentation du générateur ; il doit descendre jusqu'à la partie inférieure de la chaudière, afin que l'eau froide ne tombe pas au milieu de la vapeur et n'en produise pas une condensation brusque. T est le tuyau qui se rend à la boîte à vapeur. Enfin une large ouverture qui est fermée par une plaque de métal H pendant que la machine fonctionne, permet à un homme, dans les intervalles du repos, de s'introduire dans la chaudière et de la nettoyer.

595. **Locomotive.** — Quoique notre but ne soit pas d'entrer dans les détails des formes des diverses machines qui sont employées, toutefois, il en est une qui a pris une telle importance qu'elle mérite au moins d'être mentionnée : c'est la locomotive.

On peut caractériser une locomotive par quelques mots, en disant que c'est une double machine à haute pression, portée sur les roues qui servent de volants aux autres machines : la vapeur fait tourner les roues et force la locomotive à avancer sur les rails. La chaudière constitue le corps de la locomotive ; ce qui la caractérise, c'est que la fumée passe, non plus par une cheminée ordinaire, mais par une multitude de tubes que l'eau entoure ; ces tubes forment comme une cheminée multiple, aboutissant au tuyau qui rejette la fumée à l'extérieur. Les chaudières ainsi construites se nomment *tubulaires ;* leur invention est due à M. Séguin aîné. Elles présentent à l'eau une *surface de chauffe* qui s'élève à plus de 100 mètres carrés. Pour hâter davantage la production de la vapeur, le tirage est activé 1° par le mouvement même de la locomotive, 2° par la va-

peur haute pression, qui, à sa sortie du corps de pompe, est forcée de traverser la cheminée, et qui expulse vivement l'air et la fumée sur son passage.

CALCUL DU TRAVAIL DES MACHINES A VAPEUR.

L'emploi de la vapeur comme force motrice fait naître un grand nombre de questions, dont quelques-unes seront traitées parmi les Problèmes placés à la fin de ce livre : ici, nous nous contenterons d'en donner l'énoncé.

596. **Problèmes à résoudre.** — La première question qui se présente est celle-ci : Quel poids de vapeur faut-il produire, pour emplir un corps de pompe dont la base et la hauteur sont connues; ce poids devant être calculé dans les conditions de température et de pression où la vapeur agit.

La seconde question à résoudre se rapporte au travail effectué par ce poids de vapeur, et alors la question devient double; car il faut la traiter 1° dans le cas où la machine fonctionne à pleine vapeur, 2° dans le cas où la détente est employée.

Une troisième question se présente : Quelle quantité de chaleur faut-il dépenser pour produire un pareil travail? et enfin quelle est la quantité de travail, que pourrait donner la machine, par la combustion d'un kilogramme de charbon ?

La solution de ce dernier problème est très-intéressante au point de vue économique, et c'est pour y parvenir que les problèmes précédents sont traités.

597. **Résultats.** — Les résultats de la théorie sont loin d'être d'accord avec ceux de la pratique : la première cause du désaccord, c'est que la moitié de la chaleur, que peut donner le charbon en brûlant, s'échappe par la cheminée avec la fumée qui l'emporte. Cette perte est inévitable pour que le tirage ait lieu ; il faut donc réduire à moitié les nombres que donne le calcul. Mais cette réduction opérée, l'accord entre la pratique et la théorie est encore loin d'être satisfaisant; et cela tient à ce que la théorie telle que nous l'avons exposée n'est pas complète. En effet, nous avons déterminé le travail sous la tête du piston, et ce travail ne peut évidemment pas parvenir tout entier jusqu'aux outils, que la machine fait mouvoir. Il ne le peut pas, parce qu'il doit être absorbé, en partie, par tous les mécanismes que la machine exige pour remplir sa destination. Ainsi, dans une machine à condenseur, le travail de la vapeur est en partie dépensé à mettre en jeu la pompe à air, la pompe à eau froide, la pompe alimentaire ; il faut en outre que de nombreux frottements soient vaincus ; et pour cela, la quantité de travail consommé est considérable. Voici d'après M. Morin les résultats

d'expériences faites pour déterminer ce que la pratique donne réellement, avec des machines en état ordinaire d'entretien.

SYSTÈME DES MACHINES.	EFFET UTILE par kilogr. DE HOUILLE BRULÉE.
A haute pression, sans détente ni condensation....... ..	21480
A basse pression, sans détente et avec condensation......	45000
A haute pression, avec détente et sans condensation......	57000
A haute pression, avec détente et condensation....... ..	90000

598. **Examen de la méthode de calcul.** — La méthode de calcul que l'on a toujours employée jusqu'à présent n'est pas exacte; elle pèche en théorie par plusieurs points. D'abord elle suppose que la vapeur se détend en suivant la loi de Mariotte; cela n'est pas exact : car la vapeur qui se détend se refroidit. En outre, la vapeur, qui passe de la chaudière dans le corps de pompe, absorbe une certaine quantité de chaleur à mesure qu'elle agit sous la tête du piston, et les calculs n'en tiennent aucun compte. Ces quantités de chaleur que l'on néglige sont faibles, il est vrai, si elles sont comparées à celles que nous avons calculées, mais, toutes faibles qu'elles soient, au point de vue théorique de la question, elles ont une grande importance, car elles sont réellement les seules qui soient dépensées en travail utile: tout le reste est perdu sans profit. Dans une machine sans condenseur, après avoir dépensé de la chaleur, pour convertir l'eau froide en eau chaude et pour convertir ensuite cette eau chaude en vapeur, on laisse la vapeur sortir du corps de pompe, puis s'échapper dans l'atmosphère, alors qu'elle possède encore une température élevée et qu'elle contient toute la chaleur latente de vaporisation; en un mot, alors qu'elle n'a perdu qu'une faible partie de la chaleur qui lui a été donnée. Une machine à condenseur semble recueillir la chaleur que possède la vapeur qui cesse d'agir. Elle la recueille dans la capacité du condenseur, cela est vrai; mais la pompe à air absorbe déjà une grande partie du travail et, en outre, la quantité d'eau échauffée est tellement considérable, que la machine ne peut en utiliser qu'une partie très-petite. Sur 60 kilogrammes d'eau chaude, que l'on extrait du condenseur, il n'y en a que 1 kilogramme qui retourne à la chaudière.

TRAVAIL PRODUIT PAR LA COMBUSTION DU CHARBON.

599. Après ces considérations, une nouvelle question se pose donc à nous : Quelle est, théoriquement, la quantité de travail que peut produire 1 kilog. de charbon en brûlant? La question trouve sa réponse dans les expériences faites par M. Joule, et dont il a été donné une idée au § 493. D'après ces expériences, on sait qu'une unité de chaleur peut produire un travail de 430^{km}; d'où l'on déduit que les 6 000 unités de chaleur que dégage, par la combustion, 1 kilogramme de charbon, peuvent produire un travail de 2 586 000^{km}. Ce nombre fait connaître la grandeur du travail qu'on doit espérer obtenir, lorsque, au lieu d'employer les machines actuelles qui nous paraissent si merveilleuses, si économiques, et qui dépensent cependant trente fois plus de chaleur qu'elles n'en utilisent, lorsque, au lieu de ces machines, disons-nous, d'autres auront été inventées qui, mieux conçues, feront reparaître sous forme de travail toute la chaleur que les autres dépensent sans profit. Alors avec un kilogramme de charbon seulement la machine exécutera le travail qu'elle ne fait jusqu'ici qu'avec 25 à 30 kilogrammes; la dépense de combustible se réduira au $\frac{1}{25}$ de ce qu'elle est aujourd'hui.

600. Cet examen fait comprendre toutes les espérances de succès, que donnent les inventions où l'on substitue à l'eau des liquides qui ont une faible chaleur latente de vaporisation; circonstance qui réduit d'autant la perte de chaleur. On comprend encore davantage celles que font concevoir les machines dans lesquelles, au lieu d'employer des liquides, on emploie directement des gaz dont l'élévation de température augmente la force élastique. A ces gaz, il n'a pas fallu, du moins, donner, comme à la vapeur d'eau, l'immense quantité de chaleur latente que la vapeur emporte avec elle. Il n'y a pas à en douter : les espérances ne sont pas vaines, car la théorie est nette dans ses affirmations, et dans un avenir, qui n'est pas éloigné, la machine à vapeur actuelle cédera la place à d'autres mieux conçues dans leur principe. On peut dire que dans l'état actuel de cette partie de la physique appliquée qui s'occupe de l'emploi économique de la chaleur, nous en sommes aux premiers succès d'un art dans l'enfance.

SECTION II

Chauffage et ventilation des lieux habités.

601. Lorsqu'une salle est habitée, d'une manière continue, pendant plusieurs heures, par un grand nombre de personnes, l'air s'y altère de plus en plus et finit par devenir irrespirable. Deux causes principales

concourent à produire cet effet : d'abord la disparition d'une partie de l'oxygène qui se trouve remplacé par de l'acide carbonique ; puis le déversement dans l'atmosphère confinée, de matières organiques très-ténues provenant de la transpiration pulmonaire et cutanée. Ces substances éminemment délétères, que l'on a nommées *miasmes*, exercent une action toute spéciale sur le système nerveux de l'homme, et c'est leur présence, bien plutôt que le changement de composition de l'air, qui occasionne des malaises fréquents, des maux de tête. On comprend donc qu'il est très-important, au point de vue d'une bonne hygiène, d'opérer dans nos habitations une ventilation permanente, pour amener l'air pur du dehors et expulser l'air intérieur déjà vicié.

Pendant la saison chaude, il se produit la meilleure de toutes les ventilations : la ventilation naturelle qu'on obtient, en ouvrant portes et fenêtres. Au contraire, pendant l'hiver, pour maintenir une température convenable dans les appartements, nous sommes obligés de les clore le mieux possible. Dès lors le double problème d'un chauffage régulier et d'une ventilation permanente doit être résolu. L'air de nos habitations présente toutes les garanties de salubrité désirables quand son renouvellement a lieu, à raison de 8 mètres cubes par homme valide et par heure. Dans les salles d'hôpital, le chiffre doit être porté à 18 mètres cubes à cause de la plus grande abondance des miasmes dont nous avons parlé.

602. **Chauffage par les cheminées.** — Dans ce mode de chauffage, qui est le plus ancien et le plus répandu, le combustible brûle dans un foyer au contact de l'air. La portion de cet air qui n'a pas servi à la combustion s'échappe avec les produits gazeux, qui ont pris naissance, par un long conduit vertical — la cheminée — qui les déverse à l'extérieur. Mais, comme ce conduit a une large section, les *gaz brûlés* et la fumée ne sont pas seuls transportés au dehors, il y a encore une portion notable de l'air de l'appartement, qui, sans servir à la combustion, pénètre dans la cheminée, s'y échauffe et, en vertu de sa moindre densité, s'échappe mélangée aux autres matières gazeuses, en produisant une sorte d'appel ou *tirage*, car l'air qui sort par le tuyau, tend sans cesse à produire une raréfaction momentanée dans l'atmosphère de la pièce, et l'air froid du dehors le remplace en rentrant par les joints des portes et des fenêtres. Ainsi l'atmosphère contenue dans la salle échauffée se renouvelle d'elle-même sans l'intervention d'aucun moteur étranger : au point de vue de la ventilation, la cheminée présente donc d'immenses avantages.

Il est évident qu'une cheminée, qui se trouverait dans une chambre hermétiquement close, ne pourrait que mal fonctionner ; une portion de la fumée devrait nécessairement rentrer dans la pièce. On comprend, en effet, que pour l'équilibre des pressions il est nécessaire qu'un double courant s'établisse, dans ce cas, à l'intérieur du conduit de fumée, l'un ascendant

formé par l'air chaud, l'autre descendant formé par l'air froid. Est-il, dès lors, possible que le courant descendant ne ramène pas dans l'appartement une portion de la fumée qu'il rencontre sur son passage? Si l'on veut qu'une cheminée ne fume pas, il faut, en recourant à un conduit auxiliaire, ouvrir un large accès à l'air du dehors. Le système le plus rationnel consiste à établir une prise d'air par un canal placé au-dessous du parquet et à faire circuler cet air autour du foyer, pour qu'il s'échauffe avant de pénétrer dans l'intérieur de la chambre.

Ainsi, comme appareil de ventilation, la cheminée est excellente; en est-il de même au point de vue du chauffage? Par la disposition adoptée, le combustible en brûlant ne fournit de la chaleur à la pièce que par voie de rayonnement; comme l'air est diathermane pour les rayons de haute température, cet air s'échauffe peu, au moins d'une manière directe. Ce sont les parois de la chambre, les murs, qui doivent tout d'abord absorber la chaleur émise par le foyer, pour la céder ensuite à l'air, soit par contact, soit par un rayonnement de chaleur obscure. Quand on n'emploie qu'une cheminée, il faut beaucoup de temps, pour que l'air, qui remplit une vaste salle, acquière en hiver une température convenable.

Ce n'est pas tout: la cheminée est un appareil de chauffage désavantageux au point de vue de la dépense : la combustion produite est toujours très-incomplète; une notable partie du charbon et de l'hydrogène, contenus dans la substance qui doit brûler, se dégage sous forme de produits empyreumatiques, de carbures d'hydrogène de diverses sortes et de matières charbonneuses formant la suie. Il y a donc une fraction importante de la masse totale du combustible qui est dépensée en pure perte puisqu'elle s'échappe sans produire d'effet utile. D'un autre côté, la grande masse d'air, qui s'élève constamment dans le tuyau, entraîne avec elle une quantité considérable de la chaleur cédée par le combustible.

Ce que nous venons de dire se résume en deux mots: la cheminée ventile très-bien et chauffe très-mal.

603. **Tirage des cheminées.** — Il se présente dans le système que nous venons de discuter une question de physique assez importante : Comment peut-on exprimer la grandeur de la force qui détermine l'ascension de l'air et des gaz brûlés dans la cheminée? En outre quelles sont les diverses causes qui influent sur la valeur du tirage?

Pour expliquer ceci, considérons un long tube à deux branches verticales égales et parallèles, communiquant par le bas : ce sera, si l'on veut, un siphon renversé, à branches d'égale hauteur. Supposons, contenu dans ce tube, de l'air, qui ait partout la même température et par suite la même densité. N'est-il pas évident que tout se passe, au point de vue de l'équilibre, comme si le gaz était remplacé par un liquide qui aurait exactement le même poids spécifique que lui? Nous pouvons donc raisonner de la manière

suivante : Sur des éléments plans d'égale étendue, choisis dans le tube de communication et situés au-dessous de chaque branche verticale, les pressions sont les mêmes : les colonnes gazeuses ayant, l'une et l'autre, une même hauteur h se font mutuellement équilibre. Supposons maintenant que l'une des branches se trouve à la température primitive t, l'autre à la température t'. La hauteur de la nouvelle colonne gazeuse qui fera équilibre à la première sera h', et si l'on veut que l'équilibre ait lieu dans le siphon renversé, il faudra allonger le tuyau, qui correspond à la colonne la plus chaude, d'une quantité égale à $h' - h$. Or, en assimilant toujours les colonnes gazeuses à des liquides, on peut écrire que les hauteurs h et h' au-dessus du tube de communication sont en raison inverse de leurs densités d_t et $d_{t'}$:

$$\frac{h}{h'} = \frac{d_{t'}}{d_t},$$

mais d'après la formule (c) (265) on a :

$$\frac{d_{t'}}{d_t} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}, \quad \text{donc} \quad h' = h\left(\frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}\right),$$

et approximativement :

$$h' = h\left[1 + \alpha\,(t' - t)\right]; \tag{a}$$

c'est-à-dire que le tuyau contenant la colonne d'air échauffé devra être allongé d'une quantité égale à $h\,\alpha\,(t' - t)$. Si, au lieu d'allonger le tuyau vertical, comme nous l'avons supposé, on lui laisse sa longueur première, la pression de haut en bas exercée sur l'élément inférieur diminuera d'une quantité égale au poids d'une colonne d'air à t'° ayant pour base cet élément et pour hauteur $h\alpha\,(t' - t)$. L'équilibre n'est donc plus possible et l'air contenu dans la branche échauffée subissant de bas en haut une pression supérieure à celle qui le sollicite de haut en bas devra s'écouler, par l'extrémité de la branche la plus chaude avec une vitesse, qui dépendra de la différence des deux pressions.

Cette conséquence sera encore vraie, quelle que soit la section de la branche, qui est restée à la température t. Nous pouvons donc appliquer notre raisonnement au cas de la cheminée ordinaire, qui représente la branche échauffée de notre siphon renversé ; et nous arrivons alors à cette conséquence : que le tirage croîtra avec la hauteur de la cheminée et avec l'excès de la température de l'air, qui y est contenu, sur celle de l'air extérieur. On comprend maintenant la nécessité, pour produire un tirage actif, de ces hautes cheminées qu'on élève à grands frais dans les usines.

Il ne faut pas croire cependant, que le tirage puisse croître indéfiniment

à mesure que la hauteur de la cheminée augmente. La température moyenne va en décroissant dans le tuyau, dont la hauteur devient plus grande. En outre, les frottements de l'air contre les parois intérieures devenant de plus en plus considérables à mesure que le tuyau s'allonge, la vitesse du courant se trouve diminuée par ces deux causes.

Les cheminées ordinaires doivent s'élever, au minimum, jusqu'à 7 à 8 mètres, au-dessus du sol de la pièce échauffée, et à $1^m,50$ à 2 mètres au-dessus de la toiture. Le tuyau ne doit pas avoir une trop large section, qui faciliterait l'établissement de ces deux courants en sens inverse, qui font fumer les cheminées. Enfin, il est utile de les surmonter d'un chapeau cylindrique percé à froid de nombreux trous dont les bavures dirigées vers l'extérieur empêchent le vent, quelle que soit sa direction, de s'engouffrer dans le tuyau de la cheminée et de refouler la fumée jusque dans l'intérieur de la pièce.

604. **Chauffage et ventilation des grands établissements.** — Les systèmes, adoptés jusqu'ici pour le chauffage et la ventilation des grands établissements, se groupent tous, dans cinq classes principales :

Calorifères. ...	{	à air chaud.
		à eau chaude.
		à vapeur.
Poêles........	{	simple.
		calorifère.

605. I. **Calorifères à air chaud.** — Dans ce système, le foyer est toujours placé, soit dans des caves souterraines, soit dans des salles inférieures à celles qui doivent être échauffées. Ce foyer présente, à son pourtour, un revêtement en maçonnerie formé de corps mauvais conducteurs de la chaleur, de briques par exemple. Tantôt, l'air qui a déjà servi à la combustion, parcourt de longs tuyaux au contact desquels l'air pur appelé du dehors vient s'échauffer. Dans ce cas, on doit toujours s'arranger de manière à ce que le courant d'air froid, qui pénètre dans le calorifère, suive, dans ses contacts successifs, une marche inverse de celle de l'air brûlé. Tantôt, l'air extérieur traverse lui-même les tuyaux métalliques placés à proximité du foyer et portés à une haute température. Dans tous les cas, c'est cet air extérieur, rendu chaud par le rayonnement ou par le contact des surfaces métalliques multipliées à dessein, qui parvient par de longs conduits, dans des pièces assez éloignées du foyer, et y produit d'abord une élévation de température, puis un excès de pression, dont le résultat est une ventilation continue.

606. **Avantages et inconvénients des calorifères à air chaud.** — Un avantage évident offert par ce système, c'est que la ventilation est la conséquence nécessaire du chauffage. L'air pur et chaud qui arrive dans

une salle par les bouches de chaleur, élimine toujours un égal volume d'air vicié. Mais, quelles que soient les dispositions adoptées, il y a nécessairement une déperdition considérable de calorique, toutes les fois que le trajet à parcourir par l'air chaud est un peu long; surtout lorsque le conduit qui l'amène dans les salles de l'établissement traverse un sol humide. En outre, il y a un inconvénient réel à ce que l'air, avant d'arriver dans l'appartement, se soit trouvé en contact avec des surfaces métalliques quelquefois rouges de feu; l'air se dessèche et les matières organiques qui se décomposent, au moment où elles touchent une substance incandescente, donnent une odeur fort désagréable.

607 II. **Calorifères par circulation d'eau chaude. — Principe théorique.** — Dans ce second système, c'est l'eau qui sert de véhicule à la chaleur ; elle va la prendre au foyer, et, à l'aide de longs tuyaux bien étanches, elle l'apporte dans les différentes salles de l'établissement. Là, sa température s'abaisse, elle cède à l'air ambiant la chaleur dont elle s'est précédemment emparée; puis, après s'être suffisamment refroidie, elle revient à son point de départ, la chaudière, pour y puiser une nouvelle dose de chaleur.

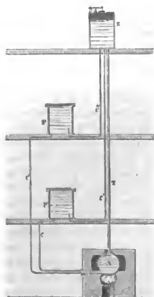


Fig. 248.

La connaissance du principe théorique des calorifères à eau chaude nous permettra d'être bref sur leur description. Ils se composent 1° d'une chaudière A (*fig.* 248), posée sur le foyer et dans laquelle l'eau vient sans cesse prendre de la chaleur; 2° d'un canal vertical T, de grand diamètre, arrivant, en ligne droite, à la partie supérieure de l'édifice et destiné à servir de canal de conduite à l'eau chaude; cette eau monte d'elle-même en vertu de la faible densité, qui résulte de son élévation de température; 3° d'un réservoir E dit *vase d'expansion* auquel vient aboutir le canal précédemment décrit et qui recueille, à tout instant, le liquide chaud venant de la chaudière; 4° de tubes métalliques C'', C''' destinés à conduire l'eau aux pièces que l'on veut chauffer jusque dans des réservoirs cylindriques figurant des poêles P et P'; 6° de tubes de rentrée C, C', semblables à ceux qui partent du vase d'expansion, et qui aboutissent finalement à la partie inférieure de la chaudière.

608. **Avantages et inconvénients des calorifères à eau chaude.** — Ce mode de chauffage présente des avantages évidents : 1° la masse liquide, qui circule d'une manière continue, rend le chauffage très-régulier ; le refroidissement des poêles à eau chaude est très-lent, à cause de la grande chaleur spécifique de l'eau ; 2° la température des surfaces métalliques, qui forment les parois des poêles, n'est jamais assez élevée pour que leur contact puisse occasionner des brûlures et des incendies ; 3° l'alimentation de l'eau dans la chaudière est rendue presque nulle, car la perte par évaporation est insignifiante ; 4° la chaudière s'altère peu avec le temps, il ne s'y forme qu'un faible dépôt, puisque c'est la même eau qui sert constamment. Mais, à côté de ces avantages, se trouvent des inconvénients sérieux : les tuyaux de conduite de l'eau exercent, par leur poids, une forte pression sur les planchers; les poêles qui servent de réservoirs supportent eux-mêmes dans les rez-de-chaussée des bâtiments élevés des pressions considérables ; des explosions peuvent avoir lieu et surtout des fuites se manifester dans les tuyaux ; enfin les frais d'installation et la dépense quotidienne du chauffage sont assez élevés. Ceci s'explique du reste très-bien ; il doit y avoir un accroissement de dépense par le fait même de la continuité du chauffage, continuité qui est superflue dans la plupart des cas. A quoi bon, par exemple, entretenir toute la journée de l'eau chaude dans des salles habitées seulement pendant quelques heures? On peut se soustraire, il est vrai, à cette permanence dans le chauffage ; mais c'est à l'aide de dispositions assez compliquées qui multiplient les chances de fuite, sans qu'il en résulte finalement une grande économie dans la dépense de combustible. En résumé, ce système, combiné presque toujours avec une ventilation forcée, paraît surtout convenable, dans le cas de grandes pièces, qui doivent être chauffées de jour et de nuit, telles que les salles des hôpitaux.

609. **Chauffage à la vapeur.** — Le principe théorique est ici fort simple. De la vapeur d'eau, qui se produit continuellement dans un générateur muni de tous ses accessoires, est amenée dans un réservoir, où elle se condense, en cédant à l'enceinte voisine toute la chaleur latente, qu'elle possédait et qui la maintenait dans son état de vapeur. L'eau résultant de la condensation est reprise par des tuyaux métalliques, chargés de la rapporter à la chaudière, où elle éprouvera ultérieurement une vaporisation nouvelle. Ce système est supérieur à celui des calorifères à air chaud, lorsqu'il s'agit d'un chauffage intermittent dans des salles d'une très-grande capacité, et lorsqu'il faut produire, à un instant donné, dans une portion de l'enceinte, une élévation de température, sans être obligé d'échauffer en même temps la masse d'air tout entière. Un pareil mode de chauffage fut installé à la Bourse de Paris, en 1828, sur l'avis d'une commission composé de Gay-Lussac, Thenard et Darcet.

Mais ce procédé, si utile dans quelques cas, a ses défauts. Des réparations fréquentes deviennent nécessaires aux tuyaux; une alimentation presque continue de la chaudière entraîne un nettoyage fréquent, en raison des dépôts qui s'y forment. Si, à cet entretien coûteux de l'appareil, nous joignons les dépenses considérables du chauffage, si nous rappelons la nécessité, où l'on est, d'expulser l'air qui se trouve dans les tuyaux et qui finirait par s'opposer à la condensation de la vapeur; si nous signalons enfin les accidents, qui proviennent de la dilatation de ces tuyaux passant par des températures très-diverses, nous serons en droit de conclure que le chauffage à la vapeur ne peut être employé que dans des cas très-restreints.

610. **Poêles.** — Nous l'avons déjà dit : la cheminée ventile fort bien et chauffe très-mal; c'est exactement l'inverse qu'il faut dire, lorsqu'on veut exprimer en quelques mots ce que donnent les poêles au point de vue de la ventilation et du chauffage: ces appareils procurent un chauffage économique, mais la ventilation qu'ils déterminent est presque nulle. Il résulte de cette indication que les poêles seront utiles dans quelques cas, et désavantageux dans un plus grand nombre.

Leur utilité tient surtout au chauffage facile qu'ils permettent, à l'économie de combustible qu'ils procurent. Ce dernier résultat est surtout sensible lorsque le grand développement de leurs surfaces de chauffe permet de profiter de la majeure partie de la chaleur développée dans le foyer. Ainsi, que dans un poêle en métal, la combustion soit peu vive, mais persistante; que dans un poêle en terre cuite, elle soit énergique et qu'elle dure assez de temps, pour élever la température du revêtement en maçonnerie; qu'en même temps, la fumée ne puisse s'échapper qu'à une température assez basse : celle que requiert le tirage (condition réalisable par le développement du tuyau à fumée), et l'on obtient, avec les poêles simples, le maximum d'effet. Mais remédie-t-on, par ce moyen, à l'insalubrité, qu'entraîne leur emploi? Évidemment non. Ces appareils ne produisent jamais une ventilation suffisante, l'appel de l'air est d'autant plus faible, qu'ils sont mieux appropriés à un chauffage économique. D'autres défauts leur sont reprochés; les poêles dessèchent l'air ambiant, et lui communiquent une odeur désagréable; l'élévation trop forte de température de leurs parois métalliques est, en outre, une cause fréquente d'incendie.

611. **Poêles calorifères.** — Au lieu de chauffer simplement l'air d'une salle par l'intermédiaire des parois métalliques d'un poêle, et d'obliger l'air froid du dehors à s'introduire par les joints des portes et des fenêtres, servons-nous de la chaleur dégagée, d'abord pour produire un appel continu de l'air extérieur, ensuite pour élever la température de cet air avant qu'il ne pénètre dans la pièce : alors la ventilation sera la conséquence du

chauffage. On comprend, en outre, que si nous parvenons à rendre suffisamment rapide le courant d'air qui se produira au contact du poêle, la paroi métallique se trouvera constamment refroidie et les inconvénients signalés dans le cas des poêles simples ne pourront se manifester : ces diverses conditions se trouvent précisément réalisées dans les poêles-calorifères.

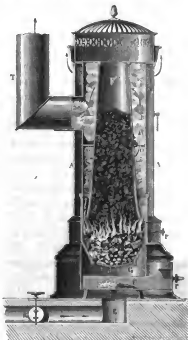


Fig. 249.

Voici la description sommaire de l'un d'eux : Un poêle en fonte BB (*fig.* 249) pose sur le sol à l'aide de trois pieds de même métal. Ce poêle est constitué par un foyer F et par un cylindre de tôle qui communique avec un tuyau à fumée T, ce tuyau s'élève d'abord verticalement à une hauteur de 1 ou 2 mètres, se recourbe horizontalement, traverse une portion de la salle à échauffer et vient aboutir à une cheminée ordinaire juxtaposée à la cheminée d'appel dont nous parlerons tout à l'heure. Les deux cheminées sont séparées, dans une partie de leur parcours, par une plaque assez large destinée à transmettre une portion de la chaleur de l'air brûlé à celui du tuyau d'appel. Le cylindre qui surmonte le foyer est enveloppé par un manchon AA de tôle, d'un plus grand diamètre, qui descend jusqu'à la surface du sol où il est fixé, et sert de chemise au cylindre. Cette enveloppe présente à sa partie supérieure et latérale de larges ouvertures S, S garnies de toile métallique, par où l'air chaud s'échappera dans la salle. Cette même enveloppe communique à sa partie inférieure avec un canal EE pratiqué dans le sol et qui se prolonge jusqu'à l'extérieur du bâtiment pour y puiser de l'air pur; le canal est muni d'un registre R qui permet de régler ou même de supprimer, au besoin, la prise d'air extérieur.

A une assez grande distance du poêle-calorifère, dans l'épaisseur de l'un des murs ou dans les coins de la pièce, sont placés des conduits verticaux servant de cheminées d'appel pour la ventilation. Ces canaux se prolongent au-dessus de la toiture et débouchent dans la salle par deux

ouvertures, l'une très-près du sol pour la ventilation de l'hiver, l'autre, à 50 centimètres du plafond, pour la ventilation de l'été.

Cela posé, il est facile de comprendre le jeu du poêle-calorifère. L'air contenu dans la partie annulaire comprise entre le poêle BB et son enveloppe AA s'échauffe par contact et par rayonnement. Il s'élève en vertu de sa faible densité jusqu'aux orifices d'écoulement de cette enveloppe. En pénétrant dans la pièce il se mêle à l'air qui s'y trouve, lui transmet une partie de sa chaleur et gagne ensuite la partie supérieure de la salle. Parvenu dans cette région, l'air chaud s'étend en couches horizontales. Les couches qui arrivent successivement agissent par leur force élastique sur celles qui les ont précédées, les déplacent l'une après l'autre et les entraînent dans une marche descendante. Dans ce parcours, elles s'emparent de tout l'air vicié par la respiration, arrivent au niveau de l'orifice inférieur de la cheminée d'appel, par où elles s'échappent un peu refroidies et chargées de la plupart des miasmes disséminés dans l'air de la pièce.

Un système analogue de chauffage fut installé il y a vingt-cinq ans environ sur les indications de M. Péclet, dans plusieurs salles d'écoles; il a produit les meilleurs résultats au point de vue de l'assainissement.

Le poêle-calorifère de M. Martin, de Besançon, que représente la figure 249, a l'avantage de pouvoir être rempli de coke pour toute une journée. Le coke introduit dans la capacité FF' ne brûle qu'en bas vers F; cela tient à ce que cette capacité est fermée de toutes parts sauf en l et l' par où la fumée se rend dans le cylindre de tôle BB et ne peut s'échapper par le tuyau T qu'en traversant l'ouverture O d'une cloison transversale.

612. **Données numériques concernant le chauffage et la ventilation.** — Pour compléter la question qui vient de nous occuper, nous indiquerons quelles sont les principales données numériques que la science fournit quand on veut déterminer, à l'avance, l'étendue des surfaces de chauffe nécessaire à la ventilation et au chauffage des salles de dimensions connues. Nous donnerons en même temps les moyens de calculer la dépense de combustible. — Les nombres sont extraits du *Traité sur la Chaleur* de M. Péclet. On trouvera dans le recueil de problèmes quelques questions sur ce sujet.

Quand la fumée et les gaz brûlés sont à 800° dans le foyer et à 200° à l'extrémité du tuyau à fumée, la transmission de chaleur à travers les parois du poêle est par mètre carré de surface de chauffe et par heure :

Avec la tôle....................................	de 1 700 à 2 000 calories.
Avec la fonte, sous une épaisseur de $0^m,01$.......	de 4 000 à 5 000 —
Avec la terre cuite, sous une épaisseur de $0^m,01$.	de 1 500 à 1 800 —

Les quantités de chaleur transmises par mètre carré et par heure, de

l'intérieur de la salle à l'extérieur, par l'intermédiaire des murs, quand la différence de température monte à 20° est :

POUR UNE ÉPAISSEUR DE :	MURS EN PIERRE.	MURS EN BRIQUES.
0m,20	55	45
0 , 30	41	33
0 , 40	32	25
0 , 50	27	21
0 , 60	23	18

Quand le chauffage est intermittent au lieu d'être continu, il faut, au moment de la reprise, une grande restitution de chaleur. On doit compter alors sur une perte moyenne de 70 calories, par mètre carré de surface de mur et par heure; pour les vitres la perte est de 80 calories.

Enfin, on doit estimer la consommation de combustible, en partant des nombres suivants :

NOM DU COMBUSTIBLE.	CHALEUR DÉGAGÉE par kilogr.
Houille	7 500 calories.
Coke	6 000 —
Bois	2 800 —

On doit retrancher de chacun de ces nombres environ les 0,4 de leur valeur, représentant la chaleur enlevée par les gaz qui s'échappent par la cheminée.

CHAPITRE VII

NOTIONS DE MÉTÉOROLOGIE.

613. Notre atmosphère est le théâtre de phénomènes physiques très-variés, qui s'accomplissent sous nos yeux, sans que nous puissions en modifier la production; ils apparaissent et disparaissent, d'une manière qui semble, au premier abord, capricieuse, et pourtant il n'est pas douteux que tous ces phénomènes, ne soient soumis, comme ceux que nous avons étudiés, à des lois parfaitement invariables. La découverte de ces lois a de tout temps préoccupé les esprits, car il y a pour l'homme, dans ce nouvel ordre de faits, plus qu'une affaire de curiosité scientifique; ses intérêts les plus directs se trouvent en jeu : sa santé, son bien-être général, la fer-

tilité du sol, la production des récoltes sont sous l'influence immédiate des phénomènes que l'on a appelés *météorologiques*. Quel avantage n'y aurait-il pas à pouvoir, d'après certaines indications, prédire l'apparition de telle ou telle perturbation atmosphérique, à pouvoir connaître à l'avance avec quelque certitude si le temps sera beau ou mauvais!

Malheureusement, la complexité des causes qui concourent à la production d'un même effet est telle ici que, malgré le progrès des autres branches des sciences naturelles, la météorologie est restée dans l'enfance. Il a été, jusqu'à ce moment, impossible de démêler les influences, qui interviennent, avec une netteté suffisante pour arriver à une explication admissible. Dans l'état actuel de nos connaissances, il est impossible de prévoir, même à un court intervalle, quel temps il fera, quel changement produira dans la température de l'air la direction du vent, etc. Cette infériorité relative de la science des météores tient d'ailleurs à plusieurs raisons qu'il est facile de concevoir. D'abord les procédés ordinaires de la méthode expérimentale ne sont pas ici applicables. Nous ne pouvons reproduire, par les expériences directes exécutées dans nos laboratoires, aucun de ces phénomènes, quelquefois si imposants, dont nous sommes les témoins dans la nature. Nous observons les phénomènes, nous en mesurons la durée, l'intensité dans quelques cas : de nos observations résultent des volumes de chiffres au milieu desquels il est fort difficile de faire jaillir la relation de cause à effet, l'expression simple de la loi physique. D'autre part, l'observation peut-elle être féconde en résultats utiles, lorsqu'au lieu de marcher du simple au composé dans la recherche de la vérité comme le veut la logique, nous sommes obligés d'adopter le procédé inverse? C'est dans la région inférieure de l'atmosphère, dans le voisinage du sol, que sont placés tous nos instruments de mesure, nos observations s'exécutent dans des points où agissent des influences purement locales : la configuration du sol, la nature géologique des terrains, la distribution des végétaux exercent une action, dont il est bien difficile d'apprécier la valeur.

Dans l'exposé rapide que nous allons faire des principaux phénomènes physiques, qui se passent dans l'atmosphère, nous nous bornerons à l'indication des faits les mieux connus se rattachant aux études déjà faites, dans la première moitié de ce livre. La chaleur en particulier joue un rôle très-important à la surface de notre globe; nous commencerons par l'examen des faits qui dépendent de cet agent.

614. **Température de l'air.** — Nous savons construire les thermomètres avec toute la précision désirable; nous avons le moyen de leur donner une grande sensibilité; pourtant, rien n'est plus difficile que d'estimer, à un moment donné, la vraie température de l'air. La cause de cette difficulté réside principalement dans la faible chaleur spécifique des gaz. Le

réservoir du thermomètre est affecté moins par la chaleur, que la substance gazeuse lui transmet au contact, que par les rayonnements dus aux corps voisins : le sol, les murs échauffés par le soleil, etc. Il faudrait, pour obtenir une indication qui eût quelque valeur, renouveler l'air rapidement au contact de l'appareil thermométrique, afin d'augmenter la masse relative du gaz, et de rendre son influence sur la température de l'instrument, sinon exclusive, au moins prépondérante. On réussit à produire ce renouvellement, en attachant un thermomètre à un cordon, pour le faire ensuite tourner rapidement dans l'air comme une fronde; mais, cette manière d'opérer, qui paraît rationnelle, amène avec elle quelques causes d'erreur, qui donnent de l'incertitude aux résultats, et nous pouvons mentionner parmi ces causes : le frottement et la compression de l'air.

615. Le mode, le plus généralement suivi pour mesurer la température de l'air, consiste à placer le thermomètre dans une sorte de cage, ouverte latéralement de tous les côtés, de sorte que l'atmosphère y ait un libre accès, et recouverte à sa partie supérieure, afin que l'instrument soit abrité de l'eau pluviale. La cage est supportée par une barre de fer horizontale, qui la maintient écartée à 1m,50 ou 2m du mur : cet écart diminue les effets de rayonnement, dont nous parlions tout à l'heure. La barre de fer, recourbée à l'une de ses extrémités, tourne à la volonté de l'observateur, qui peut alors rapprocher la cage de lui, sans toucher au thermomètre, au moment de l'observation. Tout l'appareil est exposé au nord d'une habitation, dont les murs sont assez élevés, pour que les rayons du soleil ne frappent jamais directement le thermomètre.

616. **Température moyenne du Jour.** — La méthode directe, qui se présente tout d'abord pour avoir la température moyenne du jour, consiste à observer le thermomètre, un grand nombre de fois dans les vingt-quatre heures, et à diviser ensuite la somme des températures obtenues par le nombre des observations. Mais une pareille méthode est très-assujettissante; on a reconnu, qu'on arrive à un résultat suffisamment exact, en n'effectuant qu'un petit nombre de mesures, à des heures convenablement choisies. Comme la température de l'air passe, dans l'intervalle des vingt-quatre heures d'une même journée, par un minimum et par un maximum (dans nos climats tempérés, le minimum arrive à peu près une demi-heure avant le lever du soleil, et le maximum vers 2 heures de l'après-midi, un peu plus tard en hiver, un peu plus tôt en été), il y a deux époques comprises entre les heures du maximum et du minimum, pour lesquelles la température est nécessairement égale à la moyenne du jour. Ne serait-il pas suffisant de faire une observation thermométrique à l'une de ces deux époques pour en conclure la valeur de cette moyenne ? Une pareille méthode ne conduirait qu'à des résultats fautifs : car dans le voisinage de cette température moyenne le thermomètre varie rapidement, et si l'observation

23

est faite un peu plus tôt ou un peu plus tard qu'à l'époque véritable, l'erreur commise peut être considérable.

Il vaut mieux observer le thermomètre plusieurs fois par jour et à des heures telles, que la moyenne, qu'elles fournissent, coïncide avec celle que l'on cherche. Les heures suivantes paraissent les plus convenables : 4 heures et 10 heures du matin; 4 heures et 10 heures du soir. On ajoute les températures observées, et on divise leur somme par 4. Trois observations peuvent suffire, il faut qu'elles soient faites à 6 heures du matin, à 2 heures de l'après-midi et à 10 heures du soir. La moyenne arithmétique des trois observations du thermomètre, à ces trois époques, donne, avec une approximation suffisante, la moyenne du jour. Enfin, on peut encore se servir du thermomètre à maxima et à minima que nous avons décrit (255) et la moyenne des deux indications donne un nombre qui diffère bien peu de la moyenne vraie.

617. **Température moyenne du mois et de l'année.** — La moyenne du mois s'obtient, en prenant la moyenne arithmétique des températures évaluées chaque jour, comme il vient d'être dit. Celle de l'année se calcule en divisant par 12 la somme des moyennes mensuelles. C'est en évaluant la moyenne annuelle d'un lieu pendant un grand nombre d'années, qu'on peut en fixer, avec exactitude, la température moyenne.

618. **Résultats généraux concernant les variations de la température en un même lieu du globe.** — En un même lieu, et dans le courant d'une année, la température suit généralement une marche assez régulière : les indications absolues du thermomètre peuvent changer d'une année à l'autre, mais la marche du phénomène est sensiblement constante. Dans nos régions tempérées, le minimum de température arrive ordinairement vers le 15 janvier ; à partir de cette époque, la température croît d'abord faiblement, pendant la seconde quinzaine de janvier et pendant le mois de février; puis l'accroissement devient rapide en avril et en mai; la température croît encore, mais plus lentement, pendant le mois de juin et de juillet, pour atteindre son maximum vers la fin de ce dernier mois. Dès le commencement d'août, la température commence à décroître d'abord avec lenteur, ensuite avec rapidité, pendant les mois de septembre et d'octobre, et elle arrive avec un décroissement, de moins en moins prononcé, au minimum du 15 janvier. Il y a donc nécessairement deux jours dans l'année, pour lesquels la température moyenne est rigoureusement égale à la moyenne annuelle. Des observations nombreuses ont montré que, dans nos régions, le minimum de température se produit vers le 14 janvier; le maximum, le 26 juillet; les jours, qui correspondent à peu près aux moyennes annuelles, sont le 24 avril et le 21 octobre.

619. On voit par ce qui précède, que les saisons astronomiques, établies d'après le mouvement apparent du soleil, sont loin de s'accorder avec les

saisons basées sur la marche de la température et qu'on pourrait appeler *saisons météorologiques*. Pour celles-ci, il serait naturel de faire correspondre au 15 janvier le milieu de la saison la plus froide, de telle sorte que l'hiver, au lieu de commencer le 21 décembre, à l'époque du solstice, aurait pour point de départ le 1er décembre, et correspondrait aux mois de décembre, de janvier et de février. Les trois autres saisons se succédant dans l'ordre ordinaire, mars, avril et mai correspondraient au printemps; juin juillet et août, à l'été; septembre, octobre et novembre, à l'automne.

620. **Température à diverses profondeurs dans la terre.** — A cause de la mauvaise conductibilité des substances, qui forment la croûte solide du globe, les variations de température de la surface sont d'autant moins sensibles dans l'intérieur de la terre, qu'on descend à une profondeur plus grande. Ainsi, dans quelques localités, un thermomètre, plongé à une profondeur de 2 ou 3 décimètres dans le sol, se trouve toujours en retard sur un thermomètre placé dans l'air, toutes les fois que la température de l'atmosphère va en croissant; il est en avance, lorsque cette dernière température décroît d'une manière continue.

En général, l'indication presque stationnaire, pendant 5 ou 6 heures, du thermomètre, plongé à une faible profondeur dans la terre, correspond à la moyenne du jour dans le lieu où l'on se trouve. Si la profondeur est suffisante, le thermomètre marquera constamment le même degré à toutes les époques, quelles que soient les variations de la température à la surface du sol, et pour une certaine couche, dont la distance à la surface varie avec le lieu considéré, le thermomètre indique toujours la moyenne annuelle de ce lieu. C'est ainsi qu'un thermomètre, placé depuis plus d'un siècle dans les caves de l'Observatoire de Paris, marque rigoureusement la température moyenne de l'année, dans cette dernière localité.

Quel que soit le point de la terre où se fassent les observations, on constate toujours que la température de la couche solide augmente avec la profondeur. Des thermomètres, placés au fond des mines, dans les puits artésiens, ont accusé une augmentation de 1° dans la température, pour un accroissement, dans la profondeur, de 20 à 30 mètres. La marche générale du phénomène est constante; ce qui change d'un lieu à l'autre, c'est l'épaisseur de la couche à traverser, pour que la température s'élève d'un degré. En adoptant le chiffre de 30 mètres, pour représenter cette épaisseur, on trouve qu'à une profondeur de 2 700 à 3 000 mètres, les couches terrestres doivent avoir la température de l'eau bouillante, et si la même loi de variation se maintenait jusqu'au centre de la terre (ce qui n'est pas probable), la température serait tellement haute, que les matières les moins volatiles y seraient toutes à l'état gazeux.

621. **De la température en divers lieux du globe.** — En ne tenant compte que de la hauteur moyenne du soleil au-dessus de l'horizon, on

serait porté à penser que la température moyenne de l'année doit décroître d'une manière régulière, depuis les régions équatoriales jusqu'aux contrées voisines du pôle. Telle est, en effet, en gros, la marche des phénomènes; mais on se tromperait gravement, si l'on se croyait en droit de déduire, *à priori*, de l'accroissement des latitudes le décroissement de température. Humboldt a le premier rendu sensibles aux yeux, par un tracé graphique exécuté sur la carte du monde, les irrégularités, que présente la distribution des températures, à la surface de la terre. Il a réuni, par une ligne continue, tous les points du globe où la température moyenne de l'année est la même; c'est cette ligne qu'il a appelée *isotherme*. En suivant un pareil procédé, on obtient une série de courbes différentes qui correspondent à différentes températures absolues : ainsi, on distingue l'isotherme de 0°, de 5°, de 10°, etc. A l'inspection de ces courbes, on voit de suite, que les isothermes sont loin de se confondre avec les parallèles, elles tracent de nombreuses sinuosités, qui les font pour ainsi dire osciller au nord et au sud d'un certain parallèle moyen. Nous pouvons donc affirmer que l'obliquité des rayons solaires n'est pas la seule cause qui modifie la valeur de la température moyenne en un lieu donné : il n'est pas douteux que la proximité des mers, les vents régnants, l'étendue plus ou moins grande des continents, ne prennent dans le phénomène une part d'influence très-notable ; nous examinerons tout à l'heure chacune de ces causes individuellement.

622. Pour le moment, montrons par un exemple frappant combien sont nombreuses ces irrégularités dans la distribution de la chaleur à la surface des continents. Choisissons l'isotherme qui passe par tous les points de l'hémisphère nord où la température moyenne est de 10°. Considérons-le d'abord à son point le plus rapproché du pôle : dans le voisinage de Londres, par une latitude de 51° 31'. En marchant du côté de l'est, on voit l'isotherme descendre de plus en plus vers le sud; il traverse la Bohême, aux environs de Prague, par la latitude de 50° 5'; nous le voyons ensuite dévier toujours vers le sud et longer la partie septentrionale de la mer Noire, en passant près de Sébastopol par la latitude de 45° 35'; de là, il traverse l'Asie et vient probablement couper sa côte orientale au nord de l'île Niphon vers le 40° degré de latitude. Nous le perdons ensuite dans le Grand Océan, pour le retrouver sur la côte occidentale de l'Amérique du Nord, vers l'embouchure de l'Orégon (latitude de 46°). A partir de ce point, l'isotherme redescend de nouveau vers le sud, il va passer, en présentant une grande convexité vers l'équateur, tout près de New-York dont la latitude est de 41° 55'. Enfin, il se redresse, tout à coup, et va au nord pour rejoindre le point de départ que nous avons choisi. Ainsi, dans ses nombreuses sinuosités, l'isotherme de 10° oscille constamment du nord au sud, en se tenant toujours entre le 51° et le 40° degré de latitude.

623. **Climats. — Lignes isochimènes. — Lignes isothères.** — L'isotherme, qui passe en un lieu du globe, n'en caractérise pas le climat. Indépendamment de la valeur absolue de la moyenne annuelle, tantôt il existe une sorte d'uniformité dans la température pendant les diverses saisons : la moyenne de l'été diffère peu de celle de l'hiver, comme à la Havane, à Saint-Denis, où la différence des deux moyennes est de 4 ou 5 degrés. Tantôt, au contraire, les chaleurs de l'été sont très-vives en même temps que les froids de l'hiver très-intenses, et l'écart des deux moyennes atteint jusqu'à 20° et 30° : ainsi à Kazan la moyenne de l'hiver est de — 14°,3, tandis que celle de l'été est + 17° ; la différence des deux moyennes est donc de 31°, 3. Dans le premier cas le climat est dit *constant*, dans le second cas, *excessif*. Des conditions climatériques, si différentes, ne conviennent pas au développement des mêmes espèces animales et végétales. La flore et la faune de deux pays peuvent donc différer beaucoup, quoique leur température moyenne soit la même. Ainsi, on ne rencontre pas dans les pays, dont le climat est excessif, les grands quadrupèdes, qui ne peuvent exécuter des migrations comme le font les oiseaux ; les plantes sensibles aux froids de l'hiver, telles que l'olivier, ne peuvent y vivre en pleine terre, quoique les chaleurs de l'été soient suffisantes pour que la floraison et la fructification s'achèvent complétement.

624. Pour arriver à une appréciation plus exacte du climat, on a imaginé de tracer de nouvelles lignes passant dans les lieux, qui ont la même moyenne pendant l'hiver ; on les a nommées lignes *isochimènes*, et aussi de tracer les courbes qui correspondent à une même moyenne de l'été, et on les a nommées lignes *isothères*. Il est clair que le climat d'une localité sera beaucoup mieux défini, quand on connaitra, par l'isotherme, l'isochimène et l'isothère, qui y passent à la fois, quelles sont les températures moyennes de l'année, de l'hiver et de l'été. Malheureusement, les déterminations déjà faites pour le tracé des *isochimènes* et des *isothères* sont peu nombreuses ; il n'est pas possible encore de donner, avec leur aide, des indications bien précises.

Nous venons de présenter des notions générales relatives à la distribution de la température sur la surface du globe, sans nous inquiéter des causes qui amènent les irrégularités apparentes que nous avons signalées. Quoiqu'il soit impossible de rendre compte de toutes les particularités d'un phénomène aussi complexe, il est cependant un certain nombre d'influences que nous pouvons mettre en lumière.

625. I. **Influence exercée sur la température d'un lieu par la fréquence des pluies.** — Lorsque le ciel est serein, la température de l'air s'élève progressivement, depuis le lever du soleil jusqu'à l'heure où cet astre a dépassé, depuis un certain temps, son point culminant. Au contraire, quand des nuages épais s'interposent, comme des écrans, sur le trajet des rayons solaires, l'intensité calorifique de ces derniers est tellement

diminuée qu'un abaissement de température peut s'observer à l'heure même où, dans l'état ordinaire, une élévation eût dû se produire. Le refroidissement est encore beaucoup plus sensible, lorsque, par une cause quelconque, ces nuages se convertissent en pluie : la grande chaleur spécifique de l'eau qui s'échauffe en touchant le sol, l'absorption de chaleur latente au moment où ce liquide se réduit en vapeur après être parvenu à la surface de la terre, expliquent, d'une manière satisfaisante, le refroidissement que l'on observe. L'influence que nous signalons, en ce moment, est surtout manifeste dans les régions équatoriales, où les pluies, comme on le sait, arrivent annuellement à des époques parfaitement fixes. Dans nos climats, nous avons souvent la preuve de cette coïncidence entre l'abaissement de la température de l'air et de fréquentes pluies. Tout le monde se souvient de l'été de 1860 qui fut, en même temps, pluvieux et froid.

626. II. **Influence exercée par les vents.** — Dans notre zone tempérée, les vents du sud et du sud-est amènent généralement une élévation de température ; les vents du nord et du nord-est produisent un refroidissement sensible. On a dressé des tables, qui donnent les températures moyennes observées dans quelques localités, aux époques où régnaient les différents vents. Nous citerons ici les résultats obtenus pour Paris et pour Londres.

	N.	N.-E.	E.	S.-E.	S.	S.-O.	O.	N.-O.
Paris.......	12°,03	11°,76	13°,50	15°,25	15°,43	14°,93	13°,64	12°,39
Londres....	7°,65	8°,08	9°,63	10°,58	11°,35	10°,86	10°,24	8°,71

Une longue observation a montré, en outre, que l'influence exercée par le vent est beaucoup plus marquée en hiver qu'en été.

627. III. **Influence due à la proximité de la mer.** — Le climat d'un pays dépend essentiellement des étendues relatives de continent et de mers qui l'entourent. Les côtes placées à l'ouest de l'Europe jouissent d'une température très-douce, tandis que sous les mêmes latitudes, dans l'intérieur du continent, la saison froide devient de plus en plus rigoureuse, à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Ce fait s'explique par deux causes principales. D'abord par la fréquence des vents du sud-ouest : ces vents, à cause de leur passage au-dessus de la mer, arrivent chargés d'une grande quantité de vapeur d'eau; ils entretiennent, par suite en hiver, dans le voisinage des côtes, une atmosphère constamment épaisse, qui empêche le refroidissement du sol de devenir aussi intense qu'il eût été par un rayon-

nement direct vers les parties célestes. Après avoir perdu, par leur passage au-dessus des premières régions du continent, la majeure partie de la vapeur d'eau dont elles étaient saturées, les masses d'air chassées par le vent d'ouest arrivent à peu près sèches dans l'intérieur des terres; elles laissent donc le ciel parfaitement pur, pendant une partie de l'hiver, et le sol se refroidit, par suite du rayonnement continu de chaleur, qui n'est pas compensé entièrement par l'action solaire.

La seconde cause tient à l'existence de courants d'eau chaude, qui, venant des mers équatoriales, baignent les côtes ouest de l'Europe et contribuent puissamment à échauffer l'air de ces régions.

628. IV. **Influence due à l'altitude.** — La température décroît à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère. Gay-Lussac, dans son ascension aérostatique, avait trouvé une température de 10° à une hauteur de 7 000 mètres, tandis que ce même jour le thermomètre marquait 25° à la surface du sol. MM. Bixio et Barret observèrent, à la même hauteur, une température encore plus basse. La raison de ce décroissement se conçoit du reste très-bien. Il suffit de se rappeler, que l'air laisse passer les rayons de haute température qui viennent du soleil, tandis qu'il s'échauffe presque exclusivement par le contact du sol. Les couches gazeuses de l'atmosphère devront donc, à un moment donné, se trouver d'autant plus chaudes qu'elles seront plus voisines de la surface de la terre. Saussure, qui a observé la variation que subit la température sur le mont Blanc, quand on a la mesure des stations situées à différentes hauteurs au-dessus du niveau de la mer, a reconnu que la loi du décroissement dépend de la saison et de l'heure du jour. En moyenne, il y a une diminution d'un degré dans la température, quand on monte de 150 mètres.

629. **Variations de la pression atmosphérique.** — Toutes les modifications, qui s'opèrent dans notre atmosphère : changements de température, courants d'air de directions diverses, ouragans, condensation de vapeur d'eau, variations dans l'état hygrométrique, etc., etc.; en un mot, tous les phénomènes météorologiques, quelles qu'en soient l'origine et la nature, modifient presque toujours la grandeur de la pression atmosphérique. Aussi, la colonne mercurielle est toujours en mouvement dans le baromètre ; on la voit, dans le courant d'une même journée, monter et descendre alternativement, sans qu'il y ait le plus souvent, dans l'air, aucune perturbation apparente, qui permette d'expliquer la variation observée. Cependant on peut reconnaître une certaine régularité dans les oscillations de la colonne barométrique pendant une même journée ; mais c'est à Humboldt, qu'on doit principalement les observations précises qui ont permis d'arriver à l'énoncé d'une loi. Le baromètre éprouve des variations diurnes, qui s'effectuent sous les tropiques, avec une régularité si parfaite, que Humboldt pouvait estimer l'heure, à un quart d'heure près, par la seule

inspection de son baromètre. Dans nos climats, les variations accidentelles sont trop nombreuses et trop considérables, pour qu'il soit aussi facile de découvrir la loi du phénomène. Pourtant, une étude longtemps prolongée a permis d'évaluer avec assez de rigueur l'amplitude de l'oscillation diurne. Il y a, en général, dans une même journée, deux maxima et deux minima : les premiers à 10 heures du matin et à 10 heures du soir, les seconds à 4 heures du matin et à 4 heures du soir. D'autre part, l'amplitude de l'oscillation diurne décroît avec la latitude : elle est de $2^{mm},28$ sous l'équateur, de $1^{mm},8$ à la latitude de 23°,55, de $0^{mm},67$ à 48° de latitude.

629 *bis*. **Changements dans la valeur de la pression moyenne de l'atmosphère, avec la latitude.** — On a cru, pendant longtemps, que la pression moyenne, indiquée par le baromètre, était partout la même au niveau de la mer, et égale à 760 millimètres ; il n'en est rien. Dans le voisinage de l'équateur, la moyenne de la hauteur barométrique sur le bord de la mer est de 758 millimètres ; elle va ensuite en croissant, pour atteindre un maximum de 762 millimètres, entre le 30ᵉ et 40ᵉ degré de latitude ; à partir de là, elle décroît, devient égale à 760 millimètres vers le 50ᵉ degré, pour diminuer encore à mesure qu'on se rapproche du pôle et devenir égale à 756 millimètres.

630. **Influences exercées par le beau et le mauvais temps.** — Les causes, qui font varier la pression atmosphérique, sont tellement nombreuses qu'il est bien difficile de croire qu'on puisse tirer parti des indications du baromètre pour prévoir le beau temps ou la pluie, même à court intervalle. Pourtant, la plupart des baromètres usuels portent, en regard des divisions numérotées de la graduation, des indications précises comme s'il existait une dépendance nécessaire entre le temps pluvieux et l'abaissement de la colonne mercurielle, entre le temps sec et l'ascension du mercure. L'observation a montré que, dans la plupart des cas, il n'y a rien à conclure du mouvement de la colonne mercurielle; il pleut souvent quand le mercure monte; le beau temps s'établit quelquefois au moment où la colonne a baissé. La seule liaison, un peu générale, que l'on ait pu saisir entre les deux ordres de phénomènes est celle-ci : lorsqu'on voit le baromètre monter d'une manière continue pendant plusieurs jours, la persistance ou l'arrivée du beau temps peuvent être considérées comme probables. De même la pluie ou le vent se montrent habituellement, après un décroissement progressif et assez prolongé de la hauteur barométrique. Une dépression brusque du mercure dans le baromètre est le plus souvent le présage d'une tempête.

On peut aussi considérer comme général ce fait remarquable d'une marche inverse, en temps ordinaire, dans les indications du thermomètre et du baromètre ; quand l'un descend, l'autre monte, et réciproquement.

631. **Des vents.** — Une expérience très-simple nous explique la cause

principale des vents. Si l'on ouvre en hiver la porte qui sépare deux chambres inégalement chaudes, de telle façon que deux masses d'air de températures différentes soient mises en communication l'une avec l'autre, on reconnaît que, vers la partie supérieure de l'ouverture, il existe un courant gazeux, qui va de la chambre la plus chaude à la chambre la plus froide, tandis qu'un courant inverse se manifeste, en même temps, vers le bas de cette même ouverture. Ces deux courants sont rendus très-appréciables par la direction, que prend la flamme d'une bougie, qu'on porte successivement en divers points de la surface de séparation des deux atmosphères inégalement chaudes. Un phénomène du même genre se manifeste, en grand, toutes les fois que dans l'atmosphère, les colonnes d'air appartenant à deux régions voisines sont maintenues par une cause quelconque à des températures différentes. La colonne la plus échauffée se dilate dans le sens de la hauteur, et la partie supérieure se déverse sur les colonnes d'air qui ont conservé leur hauteur primitive. Il doit donc régner vers les régions élevées de l'atmosphère un vent qui souffle de la région la plus chaude vers la région la plus froide, et par suite, pour l'équilibre, un courant aérien voisin de la surface du sol doit marcher de la région la plus froide vers celle qui a été plus fortement échauffée.

Quelle qu'en soit l'origine, le vent a une vitesse comprise entre des limites assez rapprochées; cette vitesse varie de 1 à 5 mètres par seconde pour les vents ordinaires, de 5 à 15 mètres pour les vents forts, de 15 à 30 mètres pour les vents violents qui déracinent les arbres; elle ne dépasse guère 50 mètres, dans le cas des ouragans les plus terribles.

632. **Vents réguliers. Brise de mer; brise de terre.** — Lorsque, par une influence qui se reproduit périodiquement, deux parties voisines de la surface de la terre acquièrent des températures différentes, le vent doit aussi paraître et souffler périodiquement dans le voisinage du sol; on a alors un vent régulier. Une confirmation de cette idée théorique nous est fournie par les courants aériens qui se montrent près des côtes. A partir de 9 heures du matin, souffle régulièrement de la mer vers la terre un vent que l'on nomme *brise de mer;* d'abord assez faible, la brise croît d'intensité jusqu'à 3 heures de l'après-midi, pour décroître ensuite avec lenteur. Peu de temps après le coucher du soleil, la brise de mer est remplacée par la brise de terre qui souffle, comme la précédente, dans une direction à peu près perpendiculaire à la côte, mais en sens inverse, c'est-à-dire de la terre vers la mer. La brise de terre acquiert son maximum de vitesse à peu près à l'époque où le soleil se lève.

Cette régularité dans la marche du phénomène se déduit, comme un cas particulier, du principe général que nous venons de poser. Pendant le jour, la terre ferme s'échauffe par l'action solaire beaucoup plus que l'eau de la mer; l'air en contact avec le sol possède une température plus élevée que

l'air placé au-dessus de la mer; par suite, le courant aérien inférieur doit s'établir de la mer vers la terre. Pendant la nuit, l'eau de la mer se refroidit peu; le sol éprouve, au contraire, un abaissement de température souvent considérable, par le fait du rayonnement nocturne. Il se manifeste encore une différence de température entre les deux masses gazeuses en contact; mais cette différence a changé de signe; le courant aérien voisin du sol marchera donc en sens inverse.

633. **Vents alizés. — Moussons.** — A l'équateur, les couches d'air sont maintenues plus chaudes que dans les régions voisines; il doit donc se produire un courant permanent cheminant de l'équateur vers le pôle dans les parties élevées de l'atmosphère, et des pôles vers l'équateur, dans le voisinage de la terre. En un mot, si aucune autre cause ne venait compliquer le phénomène, il régnerait constamment, vers les régions inférieures de l'air, un vent du nord, dans l'hémisphère boréal; un vent du sud, dans l'hémisphère austral. Mais l'atmosphère participe au mouvement de rotation du globe; près des pôles, la vitesse absolue produite par ce mouvement est faible, elle grandit à mesure que l'on approche de l'équateur. Qu'une masse d'air s'avance des pôles vers l'équateur, elle rencontrera les différents parallèles, qui, par leur mouvement de plus en plus rapide, passeront au-dessous d'elle, en allant de l'ouest à l'est, avec une vitesse plus grande que la sienne propre, en ne tenant compte que de la vitesse relative de l'ouest vers l'est. Chaque point, placé au-dessus de la surface de la terre, est donc emporté vers l'est et s'avance dans un air relativement immobile; il doit paraître frappé par un vent qui souffle des points vers lesquels le mouvement a lieu, c'est-à-dire de l'est. En réalité, pour nous, ce mouvement apparent de l'air se combinera avec son mouvement absolu vers l'équateur, et un vent de nord-est sera la résultante des deux mouvements.

C'est là précisément la direction du courant atmosphérique, que l'on commence à ressentir vers le 30° de latitude et que l'on a désigné sous le nom de *vent alizé*. Il souffle du nord-est dans notre hémisphère et du sud-est dans l'hémisphère austral. A mesure qu'on se rapproche de l'équateur, la différence des vitesses dont nous parlions tout à l'heure va croissant. La brise passe du nord-est à l'est-nord-est, pour devenir vent d'est, dans la région équatoriale.

Dans les mers voisines de l'Inde, on remarque une variation qui se reproduit annuellement dans la direction du vent. Pendant six mois, il semble venir constamment d'un certain point de l'horizon; pendant les six autres mois, il semble partir d'un point différent. On a désigné cette autre espèce de vent sous le nom de *moussons*.

634. **Vents irréguliers.** — Enfin, il est des vents irréguliers dont l'apparition ne saurait être prévue dans l'état actuel de nos connaissances, et qui sont à peu près les seuls qui règnent dans nos latitudes élevées. On a

pu seulement reconnaître, par des observations suivies, quel est le vent dominant dans chaque région. Il résulte d'un travail de M. Fournet, que le vent du sud-ouest est celui qui souffle le plus fréquemment dans le nord-est, le nord et l'ouest de la France. Dans le bassin du Rhône, c'est le vent du nord, qui domine depuis Dijon jusqu'à Viviers. Dans la zone méditerranéenne, c'est le vent d'ouest qui est le plus fréquent, du moins quand on fait des observations sur le côté ouest de cette zone; le côté oriental, la Provence, est plutôt sous l'influence des vents du nord-ouest.

MÉTÉORES AQUEUX

635. **Nuages.** — Lorsque, par une cause quelconque, une portion de l'atmosphère, antérieurement saturée de vapeur d'eau, subit un faible refroidissement, il y a passage de cette vapeur à l'état liquide. Quelques météorologistes admettent qu'il se produit, dans ce cas, des myriades de vésicules extrêmement petites, ressemblant à des bulles de savon remplies et entourées d'air saturé de vapeur, et ce serait l'agglomération de ces vésicules qui constituerait les nuages et les brouillards. On a même cherché à mesurer au microscope le diamètre de ces vésicules, et on l'a trouvé variant de $0^{mm},02$ à $0^{mm},03$. D'autres admettent (et cela nous semble plus probable), qu'au lieu de vésicules, il se forme des gouttelettes liquides extrêmement ténues, qui sont séparées l'une de l'autre par de l'air au maximum d'humidité. Quoi qu'il en soit de ces deux opinions, ce qu'il importe de bien constater ici, comme résultat de l'observation et de l'expérience, c'est que l'air humide perd sa transparence, aussitôt qu'on abaisse, d'une manière convenable, la température d'une portion de la masse gazeuse. Quand on fait le vide, sous le récipient de la machine pneumatique, on aperçoit dès les premiers coups de piston, comme un nuage qui se forme dans l'atmosphère de la cloche; il est dû au refroidissement produit dans l'air humide, par le fait de la raréfaction.

636. **Suspension des nuages.** — Qu'un nuage soit formé de vésicules creuses ou bien de gouttelettes d'eau, on ne s'explique pas, tout d'abord, comment il peut demeurer suspendu dans l'atmosphère. En se plaçant sur une montagne, à la hauteur même des nuages qui flottent au-dessus d'une plaine, on ne tarde pas à reconnaître, qu'à moins d'un courant d'air vertical qui soulève le nuage, ce dernier est habituellement animé d'un mouvement descendant. Seulement, s'il existe, au-dessous de lui, une couche d'air plus chaude que celle dans laquelle il a pris naissance, l'eau en partie condensée, qu'il contient, repasse à l'état de vapeur invisible; le nuage se dissout pour ainsi dire par la partie inférieure, tandis qu'il se reforme par la partie supérieure. On conçoit même que, dans ces conditions, il puisse paraître tout à fait immobile, quoiqu'en réalité, il descende d'une manière continue.

637. **Brouillards.** — Le brouillard est un nuage qui se forme dans le voisinage du sol. Les causes, qui, en rendant l'air sursaturé de vapeur d'eau, font apparaître le brouillard, peuvent être souvent différentes de celles qui donnent naissance aux nuages, mais le résultat est au fond semblable. Lorsqu'en gravissant une montagne, on arrive au sein d'un nuage, l'impression que l'on ressent, les effets que l'on observe sont identiquement les mêmes que si l'on se trouvait placé au milieu du brouillard. En général, le brouillard se forme souvent, le matin, le long des rivières, lorsque l'eau ou le sol mouillé des prairies prennent une température plus haute que celle de l'air environnant. La vapeur, qui se forme dans les couches d'air échauffées par le contact du sol, se condense à mesure qu'elle se refroidit en s'élevant avec l'air qui les renferme ; il y a précipitation partielle de cette vapeur et par suite opacité de l'air dans le voisinage du sol. Il se manifeste, en cette occasion, un phénomène d'apparence analogue à celui que présente l'eau qu'on fait bouillir au contact de l'air, la vapeur s'en dégage et forme, au-dessus de l'eau, comme une fumée parfaitement visible.

638. **Pluie.** — Quand la température s'abaisse au sein d'un nuage, la liquéfaction complète de la vapeur s'y produit successivement ; les gouttelettes d'eau formées se réunissent en tombant et se fondent, l'une dans l'autre, de manière à constituer des gouttes plus ou moins volumineuses, qui traversent l'atmosphère placée au-dessous du nuage, avant d'arriver à la surface de la terre. Or, pendant cette chute, deux phénomènes différents peuvent s'accomplir : ou bien les couches d'air, que la pluie traverse, sont à peu près sèches, et alors les gouttes d'eau s'évaporent superficiellement pendant une chute ; leur volume diminue, et il ne tombe sur la terre qu'une pluie extrêmement fine ; quelquefois même, la sécheresse de l'air est si grande que la pluie ne tombe que sur des points élevés du sol et ne peut atteindre le fond des vallées. Ou bien, l'air des régions inférieures de l'atmosphère est à peu près saturé, et dès lors les gouttes d'eau, qui le traversent, se trouvant plus froides que lui, en condensent à leur surface une portion de la vapeur ; dans ce cas, par conséquent, les gouttes de pluie grossissent à mesure qu'elles traversent une épaisseur d'air plus considérable.

639. **Udomètres.** — On a imaginé des appareils fort simples nommés *udomètres* ou *pluviomètres*, qui servent à mesurer les quantités de pluie, qui tombent là où l'instrument est placé. Nous donnerons une idée suffisante de leur construction en disant : qu'ils sont formés d'un cylindre en métal ouvert à sa partie supérieure, fermé par le bas et qu'on dispose verticalement à la hauteur voulue, au sommet d'un édifice par exemple ; les bords de l'ouverture de l'udomètre sont taillés en biseau, afin qu'il puisse tomber, dans son intérieur, toutes les gouttes de pluie qui se trouvent comprises dans l'aire de la section droite du cylindre. De cette façon, il suffira d'évaluer en millimètres, l'épaisseur de la couche d'eau contenue dans le

vase de métal, pour avoir la hauteur, que l'eau pluviale aurait acquise, si elle était restée tout entière, après sa chute, à la surface du sol, sans écoulement ni infiltration. Généralement un entonnoir rentrant, percé d'un trou très-petit, est soudé à la partie supérieure du cylindre, qui forme l'udomètre, afin que, lorsque la pluie cesse de tomber, l'air ne puisse pas se renouveler facilement dans l'appareil et que la perte par évaporation soit négligeable. Un tube en verre vertical, de diamètre étroit, communique par le bas avec l'appareil, et c'est par la hauteur du niveau de l'eau dans ce tube, qu'on évalue l'épaisseur de la couche d'eau qui est parvenue dans l'udomètre.

640. **Neige.** — Lorsque la température descend à 0°, ou un peu au-dessous de 0° dans la région des nuages, il se forme, au lieu de gouttes d'eau, des aiguilles de glace ; ces aiguilles se groupent et donnent naissance aux flocons de neige. On peut reconnaître la forme très-remarquable qu'affectent ces flocons, en les recevant sur une surface noire, conduisant mal la chaleur et dont la température était primitivement inférieure à 0°. Le groupement des aiguilles de glace dans les flocons s'effectue suivant des lois géométriques bien définies, qui dépendent de la forme cristalline, que prend l'eau quand elle se congèle.

641. **Rosée.** — Le phénomène de la rosée a été complétement élucidé par les expériences du docteur Wells. Jusqu'à lui, les opinions avaient été contradictoires, et aucune d'elles ne s'accordait avec les données les mieux établies de la science. Les uns admettaient que, pendant la nuit, une pluie fine tombait des régions élevées de l'atmosphère, sans altérer la transparence de l'air ; d'autres croyaient à une sorte d'exsudation ou d'émanation humide provenant du sol. Wells a montré que le phénomène se rapportait parfaitement aux lois ordinaires de la physique. Lorsqu'en hiver, les carreaux de vitre de nos appartements sont en contact, d'un côté avec une atmosphère confinée, chaude et humide, et de l'autre, avec l'air extérieur, dont la température est beaucoup plus basse, qu'observons-nous? Tout le monde a remarqué, qu'il se forme sur la face du carreau placée à l'intérieur de la salle échauffée une sorte de buée, qui va s'épaississant de plus en plus et qui ôte momentanément à la lame de verre sa transparence habituelle. C'est la vapeur d'eau, contenue dans l'atmosphère confinée, qui est venue se condenser en partie à la surface d'un corps refroidi par son contact avec l'air extérieur. Il se passe là ce que nous avons vu se produire dans l'hygromètre de Daniell (441). L'air n'était pas saturé à la température initiale qu'il possédait; mais la couche de cet air, qui touche la lame refroidie, prend elle-même une température décroissante, et il arrive un moment où la force élastique de la vapeur, qui s'y trouvait contenue (force élastique qui n'a pu changer), devient égale à la force élastique maxima qui convient à la température de la lame. A partir de ce moment, la sursaturation arrive

si le refroidissement se poursuit, et la vapeur se condense sur le corps avec lequel elle est en contact.

Ce que nous venons de dire rend un compte exact des phénomènes de la rosée.— Pendant le jour, les corps terrestres, échauffés par l'action directe des rayons solaires, acquièrent une température supérieure à celle de l'air. Quand le soleil a disparu à l'horizon, ces corps, dont le pouvoir émissif est beaucoup plus grand que celui de l'air, rayonnent de la chaleur vers les espaces célestes et se refroidissent beaucoup plus que l'atmosphère qui les entoure. Deux thermomètres placés dans une prairie, l'un en contact avec l'herbe, l'autre à un mètre au-dessus du sol, indiquent quelquefois, pendant une nuit de printemps, un excès de la température de l'air sur celle du sol égal à 7 ou 8 degrés. Sur les feuilles des plantes, sur la surface du sol devra donc s'opérer une condensation de vapeur, comme cela a lieu sur les carreaux de vitre dans l'exemple cité plus haut, ou sur la boule de l'hygromètre de Daniell. La cause du refroidissement est différente, mais la raison pour laquelle s'effectuent les dépôts de rosée est la même dans tous les cas.

642. **Circonstances qui influent sur la quantité de rosée déposée.**— La théorie qui précède fait comprendre toutes les circonstances, qui influent sur le dépôt de rosée. 1° Les corps dont le pouvoir émissif est plus grand se recouvrent d'une plus grande quantité de rosée, parce que leur refroidissement est plus intense. 2° Quand la surface du corps est abrité et qu'une partie du ciel lui est cachée, le dépôt de rosée est faible : car, si le corps perd toujours de sa chaleur par un rayonnement continu dans toutes les directions, du côté de l'abri du moins, il lui en est restitué une quantité supérieure à celle qu'enverrait le ciel s'il était découvert. 3° Lorsque le ciel est couvert de nuages, ces nuages forment abri, et on n'observe aucun dépôt de rosée. 4° Lorsque l'air est serein, le dépôt de rosée est abondant, et même le refroidissement peut devenir tel que la température descende au-dessous de 0°. Cette circonstance se présente fréquemment pendant les nuits claires du printemps ; alors les plantes gèlent, et il se dépose aussi de la *gelée blanche*. Le préjugé populaire attribue à la lune, qui brille alors de tout son éclat, les effets funestes du rayonnement nocturne, et on appelle *lune rousse* la lune à la lumière de laquelle on attribue une influence nuisible à la végétation. 5° Lorsque l'air est un peu agité, le dépôt de rosée est abondant ; mais si le vent est fort, les courants d'air empêchent le refroidissement, et le dépôt de rosée ne peut pas avoir lieu.

LIVRE TROISIÈME

ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

643. **Premiers phénomènes.** — Thalès de Milet, qui vivait 600 ans avant J.-C., savait déjà que l'ambre acquiert par le frottement la propriété d'attirer les corps légers, tels que les brins de paille ou les débris de feuilles sèches. Gilbert (1600) reconnut que beaucoup d'autres substances jouissent de la même propriété ; le verre et la résine sont de ce nombre. Il est facile de s'en convaincre : un bâton de verre frotté que l'on approche de petits morceaux de papier, de minces feuilles d'or ou de corps légers analogues (*fig.* 250) les attire, et on les voit se précipiter à la rencontre du verre. L'action attractive exercée dans ces circonstances a été attribuée à un agent particulier, auquel on a donné le nom d'*électricité :* nom tiré du mot grec ἤλεκτρον qui veut dire ambre. Ce nom d'*électricité* désigne aussi la partie de la physique qui s'occupe de tous les effets attribués à ce même agent.



Fig. 250.

Cette propriété du verre et de la résine n'appartient pas à tous les corps. Un métal, *tenu à la main*, peut être frotté indéfiniment, sans qu'il manifeste jamais la propriété d'attirer les corps légers, ou, comme on dit encore, sans qu'il ait été *électrisé*. La connaissance de ces faits avait conduit autrefois à diviser les corps en deux groupes : les uns capables de s'électriser par le frottement, on les appelait *idio-électriques ;* les autres incapables, dans les mêmes conditions, de s'électriser, on les nommait *anélectriques*.

644. **Expérience de Gray.** — La science en était à peu près là en 1727.

Pendant une période de vingt siècles, aucun phénomène nouveau n'avait été découvert sur ce sujet, lorsqu'en 1727 Gray aperçut un fait important en variant un peu les dispositions habituelles données à l'expérience. Comme il frottait un tube de verre T (*fig.* 251) portant, à l'extrémité la plus éloignée de la main, un de ces corps que le frottement n'avait jamais pu électriser, — un bouchon de liége B, — Gray mit, à un certain moment et par hasard, le bouchon en présence de corps légers ; il fut étonné de reconnaître que le liége était électrisé. Une tige de métal fixée au bouchon, dans une seconde expérience, s'électrisait aussi. Enfin d'expérience en expérience, Gray reconnut que la faculté d'attirer les corps légers était acquise, dans les mêmes circonstances, par toutes les parties d'une corde métallique de 886 pieds, soutenue au-dessus du sol par des cordons de soie, et s'il n'opéra pas sur une corde plus longue c'est qu'il « cessa par lassitude. »



Fig. 251.

645. **Fluide électrique.** — Cette propriété, que possède l'électricité de se répandre sur certains corps et d'occuper toute leur étendue quelque considérable qu'elle soit, a conduit les physiciens du siècle dernier à assimiler l'électricité à un gaz, qui a été appelé *fluide électrique*.

646. **Corps bons conducteurs, corps mauvais conducteurs.**— Quand les divers corps étaient éprouvés un à un, l'expérience de Gray réussissait avec tous ceux qui n'avaient pas pu jusqu'alors s'électriser par le frottement ; elle échouait avec tous les autres. D'où l'on a été conduit à dire : les corps anélectriques, tels que les métaux, laissent l'électricité se répandre dans toute leur étendue : ils sont *bons conducteurs* de l'électricité ; les corps idio-électriques, tels que la résine, ne permettent pas, au contraire, la propagation de l'électricité, ils sont *mauvais conducteurs* de l'électricité. Ces nouvelles appellations remplacent aujourd'hui les premières.

CORPS BONS CONDUCTEURS.

Les métaux.	Les végétaux humides.
Le charbon calciné.	La vapeur d'eau.
La plombagine.	L'air humide.
L'eau acidulée.	Le fil de lin.
Les solutions salines.	Le sol.
Le corps de l'homme et des animaux.	

CORPS MAUVAIS CONDUCTEURS.

La gomme laque.	Le soufre.
L'ambre.	Le verre.
La résine.	Le caoutchouc

La gutta-percha.
Le mica.
La soie.
L'air sec.
Les végétaux secs

647. **Corps isolants.** — Un corps bon conducteur en contact avec le sol ne conserve pas son état électrique : c'est un fait d'expérience, dont la découverte de Gray donne l'explication. Le sol, en effet, conduit bien l'électricité; il n'en reste par suite qu'une quantité inappréciable sur le corps, qui dès lors ne peut plus manifester aucune action sur les corps légers. De même, lorsqu'on touche avec la main un corps électrisé, il se décharge immédiatement; cela résulte de ce que le corps de l'homme est un bon conducteur, qui établit une communication avec le sol.

Il est nécessaire, si l'on veut garder un corps à l'état électrique, de le soutenir par un corps mauvais conducteur. Des fils de soie, des tiges de verre, des plateaux de résine servent fréquemment à cet usage. Ces substances isolent les corps de toute communication avec le sol et sont appelées à cause de cela substances *isolantes*. Elles remplissent bien leur objet; mais il faut que l'air soit sec, sans quoi la communication s'établit non-seulement par l'intermédiaire de l'air, mais par les supports qui, en se recouvrant d'humidité, deviennent bons conducteurs. Les supports de verre sont dans ce cas; toutes les fois que l'atmosphère n'est pas très-sèche, ils n'isolent bien, que s'ils sont enduits d'une couche d'une substance isolante et non hygrométrique, de gomme laque par exemple.

648. **Tous les corps s'électrisent par le frottement.** — Les nouvelles notions acquises amenèrent à reprendre les anciennes expériences, qui avaient fait croire à l'impossibilité d'électriser certains corps par le frottement. Ces expériences étaient faites dans de mauvaises conditions, car le métal que l'on frottait, était tenu à la main, et se trouvait en communication avec le sol. Nous savons à présent que pour une épreuve sérieuse, la

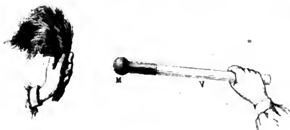


Fig. 252.

pièce métallique M doit être tenue isolée par un manche de verre V par exemple (*fig.* 252). L'expérience, faite dans ces nouvelles conditions,

montre que le métal, frotté avec la peau de chat, acquiert, tout aussi bien que la résine, la propriété d'attirer les corps légers.

649. **Hypothèse des deux fluides électriques.** — Quelques années après la découverte de Gray, en 1733, Dufay, physicien français, observa de nouveaux phénomènes, que nous allons reproduire avec un appareil classique destiné à nous servir plus d'une fois : c'est le *pendule électrique*. Il consiste en une balle de sureau dorée (*fig.* 253) soutenue par un fil de soie attaché à un pied de verre, c'est-à-dire en un corps léger suspendu à la manière d'un pendule, mais dont le support et le fil de suspension sont isolants.



Fig. 253.

Un bâton de verre, frotté avec de la flanelle, attire la balle de sureau qui s'électrise, dès qu'elle vient à toucher le verre (644). Cette balle isolée garde son électricité, lorsque l'on écarte le verre et qu'elle se détache. Tout cela résulte de ce qui a été dit précédemment. Mais si nous approchons de nouveau le bâton de verre, un autre phénomène se manifeste : la balle électrisée par le verre n'est plus attirée : elle est au contraire repoussée. Enfin de cette balle, que le verre repousse, approchons-nous un bâton de résine frotté avec de la peau de chat, une attraction se manifeste. Ainsi l'électricité de la résine n'agit pas comme celle du verre. De là les physiciens ont été conduits à admettre deux espèces de fluide électrique. Ils ont appelé *fluide vitré*, ou plus souvent *positif*, celui qui se développe sur le verre frotté avec de la flanelle; et *fluide résineux* ou *négatif* celui qui se développe sur la résine frottée avec de la peau de chat.

650. L'expérience qui précède peut être répétée, en approchant d'abord la résine, puis le verre, et elle réussit également bien. Dans les deux cas, l'électricité de la balle de sureau est repoussée par le corps qui la lui a donnée; d'où cette loi : *Les électricités de même nom se repoussent.* De même l'électricité de la balle de sureau est attirée par celle dont elle n'est pas chargée; ce qui donne une seconde loi : *Les électricités de noms contraires s'attirent.*

651. **Les deux fluides électriques se développent simultanément.** — Lorsque l'on dit qu'un bâton de verre est frotté avec de la flanelle, on peut dire avec tout autant de raison, que la flanelle est frottée avec le bâton de verre; cette nouvelle manière de considérer les faits porte à se demander, si la flanelle ne s'électrise pas en même temps que le verre. Pour résoudre la question, il faut tenir la flanelle par un manche isolant, car elle est elle-même un peu conductrice.

On prend deux plateaux (*fig.* 254), dont l'un V est de verre et l'autre F est revêtu de flanelle. On les frotte l'un contre l'autre, en les tenant par des manches de verre ; ils se chargent tous deux, mais d'électricités contraires. C'est ce que l'on constate, en approchant successivement la face frottée de chaque plateau d'un pendule chargé d'électricité négative par exemple ; le plateau de flanelle repousse la balle de sureau, l'autre l'attire. Donc, les deux électricités se sont développées simultanément.

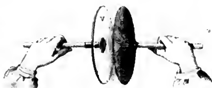


Fig. 254.

On peut donner à l'expérience une forme plus intéressante : Deux personnes montent chacune sur un tabouret à pieds de verre ; par conséquent elles sont isolées. L'une d'elles frappe avec une peau de chat sur le dos de l'autre, et aussitôt elles s'électrisent toutes les deux. On peut s'assurer, en effet, que l'une repousse le pendule de moelle de sureau électrisé par la résine ; l'autre repousse le même pendule électrisé par le verre.

652. En un mot, on peut considérer ce résultat comme général. Deux corps frottés l'un contre l'autre prennent toujours : l'un l'électricité positive, l'autre l'électricité négative. Ceci est vrai alors même qu'on emploie deux portions d'une même substance, deux lames de verre, par exemple ; il suffira qu'il existe entre les deux lames une différence quelconque, soit dans l'état des surfaces, soit dans la température, pour que l'une s'électrise positivement et l'autre négativement. Ce serait seulement dans le cas d'une identité absolue entre les deux corps frottés que l'électrisation cesserait de se manifester. On comprend, en effet, que dans ce cas il n'y aurait aucune raison pour que chaque fluide se répande plutôt sur l'une des lames que sur l'autre. Jusqu'ici ce cas particulier n'a jamais été observé.

653. Fluide neutre. — D'après ces résultats, le développement de l'électricité par le frottement a été expliqué au moyen d'une nouvelle hypothèse. Les physiciens admettent que, dans tous les corps, existent les deux électricités, unies ensemble en proportion telle, que l'action de l'une est exactement capable de neutraliser l'action de l'autre. On a donné le nom de *fluide neutre* à cette combinaison des deux fluides électriques. Le frottement et, en général, toute cause capable de produire l'électrisation des corps, n'a d'autre effet que de séparer en partie les fluides combinés ; sur l'un des corps soumis au frottement du fluide positif devient libre, et sur l'autre, du fluide négatif. Mais sur tous deux il reste toujours du fluide neutre non décomposé : du moins aucune expérience n'autorise à supposer qu'il en soit autrement.

654. **Principe de la balance de Coulomb.** — Comment varient, avec la distance, les attractions ou les répulsions des fluides électriques? Pour résoudre la question, Coulomb a construit un appareil dont la théorie repose sur l'une des lois de la torsion qu'il avait lui-même établies : les forces de torsion sont proportionnelles aux angles de torsion.

Soient, par exemple, un fil métallique FF′ (*fig.* 255) retenu par une pince, et une aiguille horizontale BD, fixée à l'extrémité inférieure de ce fil. Si l'on fait tourner cette aiguille autour du point F comme centre, en la maintenant horizontale, elle tendra par la torsion du fil à revenir à sa position première. Or Coulomb a démontré, qu'il était nécessaire de donner à la force, employée pour tordre le fil, une intensité double, triple, quadruple, quand on voulait maintenir l'aiguille écartée de sa position d'équilibre d'un angle double, triple et quadruple, c'est-à-dire quand *l'angle de torsion* était rendu deux fois, trois fois plus grand. On suppose que la force employée est horizontale, perpendiculaire à l'aiguille et appliquée toujours en un même point B.


Fig. 255.

655. **Balance de Coulomb.** — La balance de Coulomb se compose d'un fil métallique FF′ et d'une aiguille de gomme laque FB (*fig.* 256) qui porte en B une petite balle de sureau dorée. Le tout est contenu dans une cage de verre, formée d'un cylindre à large section, qui contient l'aiguille, et d'un tube TT′, qui ne renferme que le fil. Cette cage a plusieurs usages : 1° elle protége l'appareil contre les agitations de l'air extérieur, et comme l'atmosphère y est desséchée par de la chaux vive, elle donne le moyen d'opérer dans un milieu conducteur ; 2° elle sert de support à des divisions en degrés CC′ qui, placées à la hauteur de l'aiguille, en indiquent les déviations; 3° enfin, son couvercle percé d'un trou O donne le moyen d'introduire une balle A en regard de la balle B; une espèce de bouchon ferme l'ouverture O et maintient à la hauteur voulue la tige qui supporte A.

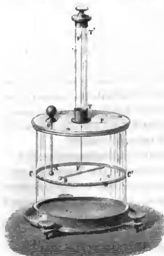

Fig. 256.


Fig. 257.

Une garniture de métal G placée au sommet du tube est coiffée d'un chapeau métallique KK' (*fig.* 256 et 257) appelé *tambour*, qui n'a de fond qu'à la partie supérieure; ce fond porte en son centre la pince *p* qui tient le fil. Le contour inférieur du tambour est divisé en degrés qui se présentent successivement devant un repère de la garniture G, quand on fait tourner le tambour. Le système est tel, que toute rotation du cylindre K'K entraîne celle de la pince, qui tourne exactement du même nombre de degrés; mais la pince elle-même peut tourner sans que le cylindre se meuve en même temps.

656. **Expérience de Coulomb.** — Au début de l'expérience, l'appareil est disposé de la manière suivante : B est placé au-dessous de l'ouverture O, et devant le zéro de la graduation; FB se trouve donc dirigé suivant le diamètre 0° — 180°. On charge d'électricité la balle A, que l'on introduit dans la balance et qui dès lors touche B. Les deux balles chargées d'une même espèce d'électricité se repoussent; B, qui est seule mobile, s'écarte et l'aiguille après quelques oscillations finit par s'arrêter à une position fixe, faisant avec la première un angle que l'on peut noter. Dans une expérience de Coulomb cet angle était de 36°. La force répulsive des deux boules qui maintenait cette torsion était donc égale à 36 fois la force qui, appliquée en B, serait nécessaire pour tordre le fil d'un degré.

657. Il s'agit maintenant de faire varier la distance : on y parvient en tordant le fil à sa partie supérieure; pour cela, on tourne le tambour KK' et l'aiguille est ainsi forcée à revenir vers sa position première. On continue à tordre jusqu'à ce qu'elle n'en soit plus distante que de 18°; l'expérience montre que pour obtenir le nouvel écart le tambour doit tourner de 126°, c'est-à-dire d'un angle tel que si l'aiguille n'était pas retenue par la force répulsive, elle reviendrait, par la réaction élastique du fil, non-seulement au zéro, mais encore elle dépasserait ce zéro de 126°. La torsion totale du fil est donc de 126° + 18° = 144°, ou 4 fois 36°. Or, c'est elle qui mesure la force répulsive; on voit donc que si la distance devient moitié la force répulisve devient 4 fois plus grande. De même, si la distance était réduite au quart, la force répulsive serait 16 fois plus considérable; et l'on a cette loi : *Les répulsions électriques varient en raison inverse des carrés des distances.*

658. **Loi des attractions.** — La loi suivant laquelle l'attraction varie avec la distance est la même, et elle se démontre avec le même appareil. Voici le mode d'expérimentation dans un cas des plus simples.

La boule A est enlevée; on charge d'électricité positive la boule mobile B, qui est d'abord au zéro, mais que l'on écarte de cette position initiale aussitôt que son électrisation a eu lieu; pour cela, on tourne le tambour supérieur de 41°. Aucune torsion ne peut se produire, cette fois, dans le fil,

puisque aucune force n'agit sur la boule B. La boule A chargée d'électricité négative est introduite dans la balance, une attraction a lieu ; la boule B s'approche de A : le fil se tord, et la distance des boules devient égale à 36° ; par suite, la force de torsion, qui fait équilibre à la force attractive, est mesurée par un angle de 41° — 36° = 5°. Pour obtenir les éléments d'une seconde mesure, on fait varier, par le mouvement du tambour, et la distance des deux boules et la torsion du fil : la première se mesure toujours sur le cercle gradué ; la seconde s'estime par la quantité dont on fait tourner le tambour. On trouve que si la distance est devenue moitié, la force attractive a quadruplé ; ce qui donne la même loi que celle des répulsions.

Seulement, la vérification de la loi des attractions, par la méthode que nous venons d'indiquer, offre les plus grandes difficultés. Cela tient à ce que la force de torsion, variant beaucoup plus lentement que la force attractive, les deux boules se précipitent presque toujours l'une vers l'autre jusqu'au contact sans qu'il soit possible d'obtenir pour la boule mobile une position d'équilibre stable. Coulomb était obligé de tendre verticalement un fil de soie dans l'intérieur de la balance et d'électriser très-faiblement les deux boules A et B ; alors, s'il existait une position de B convenant à l'équilibre, l'aiguille FB, dans ce mouvement, rencontrait le fil de soie et revenait sur ses pas pour se fixer, après une série d'oscillations, à la position voulue. Même en adoptant cette disposition ingénieuse, la vérification de la loi des attractions se fait difficilement.

659. **Influence de la quantité.** — *Les attractions et les répulsions électriques sont proportionnelles aux produits des quantités d'électricité répandues sur les deux corps qui s'attirent ou qui se repoussent.* C'est encore avec la balance de Coulomb que cette loi a été trouvée. Pour cela, reprenons l'expérience du § 657. La distance des balles est 18°, la torsion est 126° en haut, et 18° en bas, ce qui fait une torsion totale de 144°. On enlève, à la boule A, la moitié de l'électricité dont elle est chargée ; il suffit pour cela de la toucher avec une boule absolument pareille. L'aiguille cesse alors de s'écarter de 18° ; elle est moins repoussée, elle s'approche ; on la ramène à l'écart de 18° en détordant le fil par la partie supérieure. On trouve alors que la torsion *totale* n'est plus que de 72°, c'est-à-dire la moitié de la précédente. En enlevant, de nouveau, à la boule fixe la moitié de son électricité, on trouve que la force nécessaire pour maintenir la boule mobile à la même distance angulaire 18° est mesurée par un angle de 36° ou le ¼ de 144. Ainsi, quand l'une des boules conserve une charge constante, les forces répulsives qui s'exercent entre les deux boules varient proportionnellement aux quantités d'électricité contenues dans l'autre. Cette démonstration expérimentale est suffisante ; on en déduit immédia-

tement la loi générale avec la forme que nous lui avons donnée au commencement de ce paragraphe.

660. **Expression algébrique des lois précédentes.** — Soit f la force répulsive qu'exercerait, à l'unité de distance, une quantité d'électricité égale à 1, sur une égale quantité d'électricité de même nom. Soient deux corps chargés, le premier d'une quantité d'électricité q, le second d'une quantité q', et éloignés l'un de l'autre d'une distance d. La force répulsive des électricités qui chargent ces deux corps sera :

$$F = \frac{fqq'}{d^2}.$$

Si les électricités étaient de noms contraires, la force attractive aurait la même expression.

661. Ces lois sont d'une importance capitale. Elles portent, en elles, l'explication de tous les phénomènes de l'électricité statique; elles déterminent quelles actions exercent les uns sur les autres les corps électrisés; elles ne disent pas seulement à quelles conditions ces corps se tiendront en équilibre, mais elles donnent encore la possibilité de calculer, comment, soit sur un corps conducteur, soit sur un système de pareils corps, les électricités développées doivent se distribuer, pour que les fluides se tiennent à l'état de repos. Avec ces lois, dès que l'on sait qu'une ou plusieurs électricités sont libres, on peut dire d'avance, quelle sera la charge de chacune des parties du système. Il n'y a d'autres difficultés que celles que peut offrir le calcul.

La solution s'obtient toujours en cherchant quelle doit être la distribution des fluides électriques dans le système considéré, pour qu'une molécule quelconque de fluide soit soumise à des actions qui s'équilibrent. Par exemple, une sphère est chargée d'électricité positive, comment se distribuera cette électricité? Elle se distribuera de telle façon que, si l'on considère une molécule de fluide, soit positif, soit négatif, en un point quelconque de la sphère, la résultante des actions exercées sur elle par le fluide de la sphère soit égale à zéro. Nous n'avons pas à nous occuper ici des calculs qu'entraîne la solution de pareilles questions; nous nous contenterons de décrire les phénomènes; et nous plaçant dans des cas simples, nous pourrons expliquer les faits, sans en déterminer l'expression numérique.

662. **L'électricité se porte à la surface des corps.** — L'électricité réside tout entière à la surface des corps électrisés : on l'a reconnu par le calcul, et voici comment on le démontre par l'expérience.

Une sphère S soutenue par un pied isolant (*fig.* 258), est chargée d'électricité par son contact réitéré avec un bâton de résine frotté. On la recouvre

de deux hémisphères creux de métal H et H', qui en sont comme le moule et que l'on a soin de tenir par des manches isolants. On retire les hémisphères et l'on voit : 1° que chacun d'eux approché d'un pendule électrique attire la balle de sureau ; donc chacun d'eux est électrisé. 2° La sphère elle-même, qui a été enveloppée dans les deux hémisphères, n'a plus d'action sur les corps légers ; elle a donc perdu toute son électricité, qui s'est portée sur les hémisphères dès qu'ils ont formé la surface du corps.

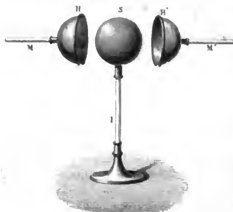


Fig. 258.

Faraday établit expérimentalement le même principe, en se servant d'un sac conique tout à fait semblable à un filet à papillon, mais fabriqué avec du lin ou du chanvre de sorte que la substance, qui forme le filet est conductrice. Deux fils de soie F et F' (*fig.* 259) sont attachés à la pointe S du cône. On charge le filet d'électricité, puis on le touche à



Fig. 259.

l'extérieur avec une balle de sureau isolée, et l'on trouve qu'elle est électrisée, car elle attire les corps légers. On touche ensuite l'intérieur de même, et la balle n'est pas électrisée. En tirant le fil F on retourne le filet, et aussitôt la surface qui est devenue extérieure se trouve cette fois électrisée, tandis que l'autre ne l'est plus.

663. **Mode de distribution de l'électricité à la surface d'un corps.** — L'électricité n'est pas distribuée en égale quantité aux différents points de la surface d'un corps, sauf dans le cas où la forme du corps est sphérique. On étudie la distribution de l'électricité en appliquant aux différents points de la surface d'un corps un petit disque de papier, doré des deux côtés, et tenu par un manche de verre : on appelle ce disque plan d'épreuve. Quand on l'enlève, il emporte avec lui d'autant plus d'électricité, que la surface, qu'il touche, est plus chargée. Coulomb a établi, par des expériences directes, que la charge prise par le plan d'épreuve est proportionnelle à celle que possédait la surface au point touché. Si l'on place ce disque à la place de la boule A dans la balance de Coulomb, on peut juger de la charge par la déviation de l'aiguille BD (*fig.* 255). Sans prendre de mesures exactes nous pouvons du moins affirmer que plus la répulsion sera grande, plus la déviation sera considérable.

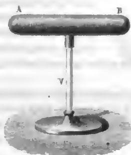


Fig. 260.



Fig. 261.

Par cette méthode, on reconnaît que sur la surface d'une sphère chargée d'électricité, le fluide libre se trouve distribué en quantité égale aux différents points. Un cylindre, terminé par deux calottes sphériques (*fig.* 260), est beaucoup plus chargé aux extrémités qu'au milieu. Pour un corps de forme ovoïde (*fig.* 261), plus le petit bout A de l'ovoïde va s'effilant, plus la charge qui s'accumule en A devient considérable.

664. **L'électricité s'accumule sur les pointes.** — Ce dernier résultat fait comprendre la charge, que doit posséder l'extrémité d'une tige terminée en pointe. Il suffit de considérer la pointe comme constituée par le petit bout de l'ovoïde, qui aurait été effilé de plus en plus. Le calcul prouve qu'une petite portion de surface, quand on la prend à l'extrémité de la pointe, doit être infiniment plus chargée que si on la choisissait en tout autre point de la même tige. Cette charge est si grande, qu'elle ne peut persister à la surface des corps ; l'électricité s'en échappe en vertu de l'action répulsive qu'exercent, les unes contre les autres, les différentes parties du fluide accumulé. La démonstration se fait en plaçant une pointe sur un conducteur quelconque : celui d'une machine électrique, par exemple. La machine ne peut plus se charger quand la pointe est très-

aiguë, ou bien elle se charge très-faiblement, si la pointe est émoussée. Cette disparition de l'électricité au fur et à mesure de sa production est accusée par le pendule que l'on place habituellement sur le conducteur. Ce pendule diverge à peine, quels que soient, les efforts que l'on fasse pour obtenir une charge assez forte. Si des pointes recourbées sont groupées en un ensemble B mobile autour d'un axe vertical, si toutes les pointes, disposées dans le même plan horizontal, sont toutes recourbées dans le même sens, comme le montre la figure 262, l'électricité en s'écoulant met l'appareil en rotation : c'est l'expérience du *tourniquet électrique*. Le phénomène de rotation s'explique par l'action répulsive de l'électricité, que dégagent les pointes et que l'air recueille, sur le fluide de même nom qui arrive, sans cesse, à l'extrémité de ces pointes.

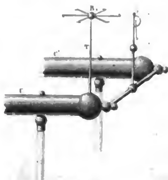


Fig. 262.

On comprend maintenant pourquoi tous les instruments qui sont destinés à produire, à recevoir et à conserver l'électricité, ne présentent que des pièces arrondies ; les formes aiguës sont évitées, sauf dans certains cas très-exceptionnels.

CHAPITRE II

ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR INFLUENCE

Un corps bon conducteur se charge, à distance, par le fait seul de la proximité d'un corps électrisé. Les divers résultats obtenus, quand on varie les conditions de l'influence qui se produit dans ce cas, ont une importance telle, qu'une fois ces résultats bien connus, tous les phénomènes d'électricité statique se dérouleront d'eux-mêmes, avec leur théorie.

665. **Appareil.** — L'étude de ces phénomènes se fait avec un appareil

très-simple, qui consiste en un cylindre métallique vertical AB (*fig.* 263), soutenu par une tige de verre V. Aux deux extrémités du cylindre, sont suspendues des balles de sureau, portées chacune par un fil de lin. Le cylindre se trouve en présence d'une sphère S placée au-dessous de lui, à une petite distance.

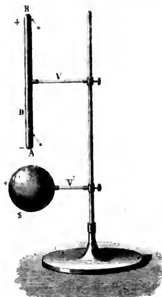


Fig. 263.

666. **Première expérience.** — On charge la sphère d'électricité positive : les balles des deux pendules s'élèvent aussitôt. Elles sont donc repoussées par le cylindre qu'elles touchaient d'abord : le cylindre s'est chargé d'électricité en A et en B (*).

Le bâton de résine frotté avec la laine repousse le pendule A, tandis que le verre frotté avec la laine repousse le pendule B. Cela montre que l'extrémité voisine de la sphère est chargée d'électricité négative, et que l'autre extrémité est chargée d'électricité positive.

667. **Explication.** — Ce phénomène s'explique très-bien par la théorie des fluides que nous avons établie. Le fluide positif de la sphère agit par influence sur le fluide neutre du cylindre : il attire l'électricité négative et la fait arriver dans les points du cylindre les plus voisins de la sphère ; en même temps, il repousse l'électricité positive dans les points les plus éloignés.

667 *bis*. **Ligne neutre.** — Lorsque le cylindre porte des pendules sur toute sa longueur, on observe que la divergence de ces pendules va en décroissant à mesure qu'on s'éloigne de A jusqu'à un certain point D, où l'écart devient nul. Une série de points jouissant de la même propriété forme une ligne circulaire contenue dans un plan perpendiculaire à l'axe du cylindre ; on la nomme la *ligne neutre*. Au delà de cette ligne les pen-

(*) Si, au lieu d'employer un cylindre vertical comme celui qui est figuré ici, on adopte la disposition qui a été le plus fréquemment usitée jusqu'à présent, celle d'un cylindre horizontal tel que AB (*fig.* 261), l'expérience, que nous venons de décrire, n'est pas concluante, et l'on ne peut pas affirmer que l'extrémité A soit chargée d'électricité ; car l'écart du pendule extrême voisin de A peut avoir pour cause, dans le cas du cylindre horizontal, l'attraction du fluide de la source tout aussi bien que la repulsion du fluide du même nom appartenant au cylindre lui-même.

dules divergent de nouveau jusqu'en B. On remarque qu'elle n'est jamais placée au milieu de AB, mais toujours plus voisine de l'extrémité du cylindre la plus rapprochée de la source ; on conçoit la raison de cette ligne neutre : l'électricité positive charge la partie supérieure du cylindre, l'électricité négative charge l'autre partie : les points où la transition s'opère de l'un à l'autre doivent être à l'état neutre.

668. **La décomposition a une limite.** — Le corps électrisé S agissant toujours, il pourrait sembler, au premier abord, que tout le fluide neutre du cylindre doit être décomposé : il n'en est rien cependant. Si la sphère est chargée faiblement, les pendules divergent très-peu ; et plus elle est chargée, plus la divergence des pendules devient grande : ce qui montre que la décomposition du fluide neutre dans le cylindre a augmenté. Elle n'était donc pas complète tout d'abord ; pour une charge particulière de la sphère elle atteint une limite déterminée.

La théorie montre que cette limite tient aux actions, qu'exercent, sur le fluide neutre du cylindre, les électricités mêmes, qui, par la décomposition, se sont accumulées en A et en B. Considérons, en effet, du fluide neutre en un point quelconque du cylindre : étudions les forces qui agissent sur chacune des électricités, qui le constituent. Sur une molécule d'électricité négative située en *m* par exemple, s'exerce 1° l'action du fluide de S, qui attire cette molécule ; 2° l'action du fluide de A, qui la repousse et par conséquent fait effort pour l'éloigner de S ; 3° l'action du fluide positif accumulé en B, qui attire cette molécule, et s'exerce par suite comme celle de A, pour l'éloigner de la sphère S. Ces deux dernières actions donnent donc une résultante qui agit en sens contraire de l'action exercée par le fluide de la sphère ; et comme cette résultante va croissant à mesure que la décomposition du fluide neutre de AB se continue, il arrive nécessairement un moment où elle est égale à la force répulsive constante provenant du fluide de la source. Quand cette égalité s'est produite, l'équilibre existe, et la molécule de fluide négatif ne peut plus se déplacer. De même, en étudiant les actions exercées sur la molécule de fluide positif situé en *m*, on reconnaît que les actions de A et de B parviendront à empêcher le mouvement de cette molécule. Alors le fluide neutre n'est plus décomposé ; la limite est atteinte.

669. **L'influence cesse.** — Le cylindre étant dans l'état que nous venons d'indiquer, l'influence peut être détruite ; il suffit pour cela de décharger la sphère ou bien d'éloigner le cylindre à une grande distance. Dans ces circonstances, les deux fluides de A et de B ne sont plus maintenus séparés par aucune action étrangère, ils obéissent à leur attraction mutuelle et se réunissent. En théorie, ce résultat n'est pas douteux et l'expérience montre qu'en effet les deux pendules retombent.

670. **Le cylindre est touché du côté le plus éloigné de la sphère.** —

Le cylindre se trouvant, de nouveau, en présence de S, les deux pendules A et B divergent comme précédemment. On met alors en communication avec le sol l'extrémité B (*fig.* 264) où se trouve le fluide positif repoussé. Aussitôt que le doigt touche le cylindre, le pendule B retombe. Ce fait n'a rien qui doive nous étonner : le corps électrisé en B est mis en communication avec le sol; il doit donc perdre l'électricité positive qui se trouve au point de contact, et qui est repoussée d'ailleurs par la sphère.

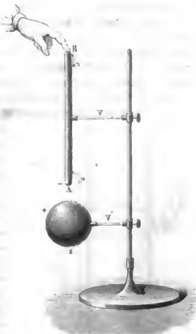


Fig. 264.

671. Mais, en même temps un autre phénomène se manifeste, qui mérite une attention particulière. Au moment du contact, le pendule A se redresse brusquement et témoigne par ce mouvement que l'extrémité A prend une nouvelle charge.

L'explication du phénomène résulte de ce qui a été dit (668). Nous savons, en effet, que le fluide positif de B faisait obstacle à la décomposition du fluide neutre. L'obstacle est enlevé; une nouvelle décomposition doit avoir lieu. Elle amène une nouvelle quantité d'électricité négative en A et repousse de l'électricité positive, qui disparaît par la communication établie avec le sol. Cette décomposition se continue nécessairement jusqu'à ce que le fluide négatif développé en A exerce, sur une molécule de fluide du cylindre, une action qui soit exactement égale à l'action de S, dont elle combat l'influence. Il est évident qu'alors seulement, l'équilibre des fluides est possible.

672. **On rompt toute communication avec le sol.** — Si l'on vient à rompre la communication établie entre B et le sol, le cylindre AB reste chargé d'électricité négative; mais si ensuite l'influence cesse, si l'on décharge S ou qu'on éloigne le cylindre, l'électricité négative n'est plus retenue en A, elle se répand sur tout le cylindre : les deux pendules divergent. Par l'emploi du bâton de résine frotté avec la laine, il est facile de constater qu'ils sont chargés tous deux d'électricité négative.

Ce résultat est digne d'attention, car il nous apprend qu'avec une source

d'électricité positive, il est possible de charger un corps d'électricité négative, et réciproquement ; cet enseignement sera mis à profit dans plusieurs de nos expériences.

673. **Le cylindre est touché en un point quelconque.** — Après avoir déchargé et le cylindre et la sphère, mettons-les tous les deux en présence dans les mêmes conditions que primitivement et faisons une nouvelle expérience. La sphère est chargée et les pendules A et B divergent : touchons alors le cylindre non plus en B, mais en tout autre point : en D par exemple (*fig.* 265). Un fait inattendu se présente. Le pendule B retombe : ce qui prouve que l'électricité positive disparaît. Quant au pendule A, il se redresse ; et cela alors même qu'on touche le cylindre au point A. En un mot, les résultats sont les mêmes que dans le cas précédent (671).

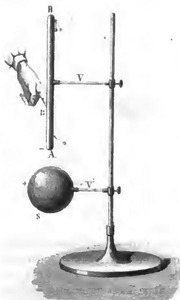


Fig. 265.

674. Ici l'explication n'est plus aussi simple : mais si l'on ne peut pas suivre toutes les phases du phénomène, on peut faire comprendre du moins que l'état définitif d'équilibre exige que B perde son électricité positive et que A soit chargé d'électricité négative comme dans le cas où le cylindre communiquait avec le sol par le point B.

En effet, quand le doigt est en D, l'ensemble des conducteurs soumis à l'influence peut être divisé par la pensée en deux parties, dont l'une serait formée par AD et par le conducteur qui aboutit au sol, et l'autre par la partie DB du cylindre. La première doit, comme nous l'avons démontré (671), posséder en A une charge supérieure à celle qui se développerait au même point, si le conducteur était isolé. Mais d'autre part, quand l'extrémité A est ainsi chargée, l'extrémité B (671) doit être à l'état neutre, pour que les fluides du cylindre AB soient en équilibre. L'état final du système sera donc le même quel que soit le point touché.

675. **Influence exercée sur un corps électrisé.** — L'influence peut s'exercer sur un corps déjà électrisé. Le corps est-il chargé d'électricité négative et la sphère d'électricité positive? Le fluide négatif du cylindre viendra tout entier s'accumuler en A, si l'influence de la sphère est suffisante. Dès que cette influence s'accroît, une décomposition de fluide neutre

se produit, le conducteur se charge d'électricité positive en B et d'une nouvelle quantité d'électricité négative en A. Toute cette série de phénomènes s'observe très-bien avec le cylindre armé de ses deux pendules.

Si le cylindre était chargé primitivement d'électricité positive, comme la sphère, une série de phénomènes analogues se présenterait. D'abord l'électricité positive serait repoussée en B, puis, du fluide négatif apparaîtrait en A par une décomposition partielle du fluide neutre du cylindre.

676. **Électricité développée par influence sur les corps mauvais conducteurs.** — Les phénomènes d'influence s'exercent sur les mauvais conducteurs, comme sur les bons conducteurs, avec cette seule différence capitale, c'est que les déplacements d'électricité, produisant la charge des corps bons conducteurs, s'exécutent avec une rapidité telle que le phénomène est comme instantané ; avec les corps mauvais conducteurs, au contraire, les mouvements d'électricité sont extrêmement lents à s'effectuer, et quand les corps sont très-mauvais conducteurs, des mois même ne suffisent pas pour amener la charge définitive des deux extrémités du corps influencé.

677. **Influence exercée sur plusieurs conducteurs placés à la suite les uns des autres.** — Si, à la suite du premier conducteur AB (*fig.* 266), on en place un second A'B', puis à la suite du second un troisième A"B",etc., tous ces conducteurs se chargent par influence. Le fluide positif de B joue, par rapport au cylindre A'B', le rôle de la sphère électrisée S, et son action, combattue en partie par le fluide de A, est favorisée par celle de S placée vis-à-vis de A'B'; le cylindre se charge. Il en est de même de A"B" et de ceux qui pourraient venir à la suite. Quand ces cylindres A'B', A"B", sont rapprochés les uns des autres, et l'influence suffisante, les fluides de noms contraires développés en B et en A' se réunissent par l'effet de leur attraction mutuelle. Le même phénomène a lieu entre B' et A", et ainsi de suite. Le premier cylindre est donc chargé d'un excès d'électricité négative, qui ne peut plus neutraliser la quantité d'électricité positive qui s'y trouve rester. Le

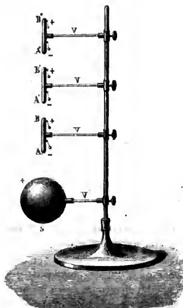


Fig. 266.

dernier cylindre, au contraire, est chargé d'électricité positive en excès.

678. **Mouvements des fluides sur un corps soumis à l'influence.** — Le phénomène précédent peut se constater avec des cylindres de très-petite étendue et très-rapprochés. On est, par conséquent, forcé d'admettre qu'un corps conducteur soumis à l'influence d'un corps électrisé se conduit, comme une série de conducteurs très-petits et très-rapprochés. Dès que l'influence commence, le fluide neutre de chaque particule successive se décompose. Dans toute une file de molécules, le fluide négatif vient à la partie antérieure de chacune, et le fluide positif à la partie opposée. Le fluide repoussé de la première molécule s'unit au fluide de nom contraire de la molécule suivante, et ainsi de suite. L'électricité négative libre, qui s'observe à la partie antérieure du cylindre, et l'électricité positive, qui se trouve à la partie opposée, ne proviennent donc pas d'une même molécule de fluide neutre décomposée. En réalité il y a eu un cheminement général de toutes les molécules de fluide du cylindre ; toutes celles qui sont de même nom ont marché dans le même sens, et chacune d'elles s'est séparée de celle à laquelle elle était unie et est venue se combiner à une molécule nouvelle. La première molécule de fluide négatif fait exception ; elle reste libre parce qu'elle n'en trouve aucune autre avec laquelle elle puisse se réunir. La dernière molécule de fluide positif est dans le même cas. Ces décompositions et ces recompositions continuent d'ailleurs tant que l'influence de la source est prédominante.

PREMIÈRES APPLICATIONS DE LA THÉORIE PRÉCÉDENTE.

679. Cette théorie fournit immédiatement l'explication de tous les phénomènes, que présente un corps soumis à l'action d'un autre qui est électrisé, c'est-à-dire qu'elle fournit l'explication de la majeure partie des phénomènes que nous avons à étudier. Elle permet de comprendre le jeu des instruments, des appareils, des machines qui servent soit à produire, soit à recueillir, soit à éprouver l'électricité.

680. **Communication de l'électricité.** — Un corps électrisé C (*fig.* 267), que l'on approche jusqu'au contact d'un conducteur isolé AB, perd une partie de son électricité, et cette électricité perdue se retrouve sur le conducteur. Jusqu'ici nous avons interprété le phénomène, en supposant un partage d'électricité entre les deux corps mis en contact : cette interprétation est erronée. En effet le conducteur AB, de même que le cylindre employé tout à l'heure (666), se charge par influence, dès qu'il est à une distance suffisamment petite du corps électrisé. A mesure que la distance diminue, la décomposition devient plus abondante et cette décomposition

continue jusqu'à ce que le conducteur arrive au contact du corps électrisé. Alors l'électricité, développée à la partie antérieure A du conducteur, s'unit à l'électricité de nom contraire, qui a produit la décomposition, et le conducteur ne reste chargé que du fluide repoussé en B. La charge a donc lieu par un double phénomène : premièrement une décomposition, secondement une recomposition de fluide neutre. En outre, l'électricité libre, qui se développe sur AB, n'est nullement empruntée au corps électrisé.

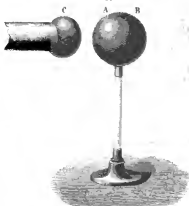


Fig. 267.

681. **Communication avec le sol.** — La même théorie explique ce qui a lieu, lorsque l'on met un corps chargé d'électricité en communication avec le sol. En réalité, ce n'est pas l'électricité du corps électrisé qui va dans le sol, mais c'est l'électricité du conducteur qui établit la communication : le corps électrisé se décharge donc par des phénomènes de décompositions et de recompositions successives. L'explication donnée dans le paragraphe précédent s'applique, presque sans aucun changement, au cas actuel.

Ainsi, quand on touche un corps électrisé, dire que l'électricité s'en va dans le sol, ce n'est point indiquer comment la décharge s'est opérée, c'est substituer à la réalité une fausse interprétation du phénomène.

682. **Pouvoir des pointes.** — Si l'on approche d'un corps électrisé l'extrémité aiguë A d'un conducteur AB isolé et terminé en pointe, aussitôt l'électricité du corps disparaît presque entièrement, tandis que le conducteur AB se trouve chargé du fluide qui a disparu. C'est ce que Franklin exprimait en disant que les pointes soutirent l'électricité.

Ce phénomène n'est autre qu'un phénomène d'influence : le corps électrisé joue, par rapport au conducteur, le rôle que jouait la sphère S (666), par rapport au cylindre AB. Il décompose en partie le fluide neutre du conducteur, attire le fluide de nom contraire, qui vient en A et s'accumule comme l'électricité le fait sur les pointes. Ce fluide s'échappe alors à travers l'air, et, sollicité par la force attractive du corps électrisé, vient neutraliser l'électricité qui s'y trouvait. Quant au fluide repoussé en B, il reste ; et comme résultat définitif, la tige est chargée : elle semble avoir enlevé l'électricité du corps.

Lorsque la pointe est mise en communication avec le sol (*fig.* 268), il est évident que l'électricité repoussée en B disparaît; d'ailleurs le corps électrisé est déchargé presque complétement. Cette expérience se trouve représentée dans la figure 268. Le pendule, qui divergeait notablement, s'est abaissé, aussitôt que la pointe a été approchée.



Fig. 268.

683. **Attraction des corps légers.** — Un corps léger, en présence d'un corps électrisé, se charge par influence, et l'attraction observée est évidemment due à l'attraction des fluides de noms contraires.

Il peut arriver deux cas : ou bien le corps léger est en communication avec le sol, et le fluide repoussé disparaît ; ou bien le corps léger est isolé, et le fluide repoussé reste, faisant obstacle à l'attraction. Dans ce dernier cas, le corps électrisé exerce deux actions de sens contraires sur le corps léger, mais ces deux actions ne sont pas égales : l'attraction l'emporte, parce que le fluide attiré est plus voisin que le fluide repoussé.

Toutefois, l'attraction, dans ce cas, sera moindre que dans le cas précédent. On le vérifie par une expérience très-simple, qui consiste à mettre en regard deux pendules égaux B et B′ (*fig.* 269), l'un isolé et l'autre qui ne l'est pas et à présenter, à égale distance, un bâton de résine frotté. La balle de sureau B en communication avec le sol s'avance vers le corps électrisé, tandis que le mouvement de la balle isolée B′ est à peine sensible.

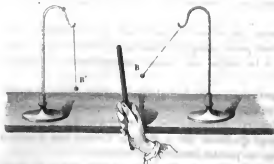


Fig. 269.

L'attraction du corps léger sera aussi très-peu sensible, si l'on remplace la balle de sureau dorée par un corps mauvais conducteur. Alors la décomposition des fluides influencés est si peu considérable, après un temps même assez long, que l'attraction se manifeste à peine.

L'explication, que nous venons de donner, paraît très-simple au premier

abord; la question présente pourtant une difficulté réelle. Ce sont les fluides électriques qui s'attirent ou qui se repoussent. Pourquoi donc les corps qui les contiennent se déplacent-ils? On comprend bien que, pour les substances qui conduisent mal l'électricité, les fluides, ne pouvant que difficilement se mouvoir dans la masse même des corps, entraînent les molécules de matière auxquelles ils sont adhérents et obéissent aux actions qui les sollicitent; mais quand la substance est conductrice, l'électricité libre se porte à la surface et ne fait plus, pour ainsi dire, partie des corps. Pourquoi donc celui-ci serait-il entraîné? Voici l'explication la plus plausible, qui se déduit des expériences de M. Matteucci: On sait que tout corps solide, quand il a été plongé dans un gaz retient, adhérente à sa surface, une mince couche de la substance gazeuse qui l'a imprégné auparavant; l'adhérence est si grande que le gaz ne se dégage que lentement sous le récipient de la machine pneumatique. On peut donc considérer la balle de sureau du pendule électrique, comme constituée par un corps conducteur, dont la surface est recouverte d'une lame d'air qui forme un vernis mauvais conducteur de l'électricité. Le fluide libre se porte à la surface de la balle, et attiré il entraîne le vernis qui s'oppose à son écoulement. On comprend donc que les phénomènes d'attraction et de répulsion aient lieu, dans ce cas, comme lorsqu'il s'agit des corps mauvais conducteurs.

ÉTINCELLE.

684. **Production de l'étincelle.** — Quand d'un corps fortement électrisé on approche un conducteur (*fig.* 270), une étincelle jaillit entre les deux corps avant que le contact ait eu lieu. Si le conducteur est isolé, on remarque qu'après l'étincelle, il se trouve chargé, comme s'il avait été mis en contact avec le corps électrisé, mais cependant il est chargé moins fortement. Quant au corps électrisé, il a perdu une quantité d'électricité égale à celle que le conducteur a prise. Cela montre que l'étincelle n'est autre chose que la réunion à travers l'air, corps mauvais conducteur, des deux électricités de noms contraires, qui se trouvent en présence, par suite des phénomènes d'influence exercés sur le conducteur.



Fig. 270.

L'étincelle jaillit à plusieurs décimètres de distance, lorsque la charge du corps électrisé est considérable; elle diminue de longueur à mesure que la charge est moins forte. Un bâton de résine, d'une grosseur ordinaire, ne donne pas d'étincelles visibles au grand jour; mais ces étincelles apparaissent très-bien dans l'obscurité.

685. **Aspect de l'étincelle.** — Lorsque l'étincelle est d'une longueur

assez considérable, on observe que sa forme est celle d'une ligne brisée en zig zags. Dans l'air soumis à une forte pression, elle forme un trait de feu, dont les dimensions en largeur sont très-petites. A mesure que l'air se raréfie, elle s'élargit, et dans un tube de verre où l'on a fait le vide, elle se répand en produisant une lueur pâle et violacée qui occupe toute la largeur du tube. Il en est de même dans le globe de verre analogue à l'œuf électrique que représente la figure **271**. Les deux tiges métalliques terminées par des boules en regard sont mises en relation l'une avec la machine électrique, l'autre avec le sol, après toutefois que le vide a été fait dans l'appareil. On voit alors une lueur pâle, d'une teinte violacée, qui va de l'une des boules à l'autre et qui s'épanouit en prenant une forme semblable à celle de l'œuf lui-même.



Fig. 271.

686. Lorsque l'électricité s'échappe d'une pointe, elle prend l'aspect d'une aigrette peu lumineuse, qu'il faut observer dans l'obscurité de la chambre noire. L'aigrette se réduit à des dimensions très-petites, presque à un point, si l'électricité qui s'échappe est négative; elle est large, quand l'électricité est positive.

687. Chaleur de l'étincelle. — La lueur, que donne l'étincelle, est accompagnée de chaleur; mais aucune démonstration directe n'a pu être donnée de ce fait. Un thermomètre, placé sur le trajet d'étincelles nombreuses, ne s'échauffe pas. M. Becquerel n'a pu observer aucun signe de chaleur envoyé à une pile de Melloni, disposée à une petite distance des conducteurs, entre lesquels jaillissait l'étincelle. Ces insuccès dépendent, sans nul doute, de la courte durée du phénomène; car si la lumière produite est analysée par des procédés, qui seront donnés en optique, on reconnaît qu'elle contient des parcelles des métaux qui forment les conducteurs entre lesquels elle jaillit, et que ces métaux sont portés aux plus hautes températures.

688. Passage de l'étincelle à travers les corps mauvais conducteurs. — Quand l'étincelle jaillit au milieu de corps mauvais conducteurs, elle les brise et en disperse les fragments de tous côtés : on le prouve en se servant du *mortier électrique* (*fig.* **272**), qui n'est autre qu'un petit mortier d'ivoire M, au fond duquel deux petites tiges T,T', en regard l'une de

l'autre, sont recouvertes d'une couche d'éther. On place une petite bille B à la bouche du mortier. Si l'une des tiges est en communication avec le sol et si l'autre est mise en contact avec une machine électrique, l'étincelle jaillit au milieu de l'éther et la bille est lancée au loin.

Dans l'expérience de Kinnersley (*fig.* 273), un phénomène analogue a lieu. Le thermomètre de Kinnersley est formé de deux vases de verre, qui composent un système de vases communiquants, à moitié pleins d'eau; l'un d'eux fermé à la partie supérieure est large, l'autre ouvert par le haut est étroit. Dans le vase large se trouvent deux tiges, dont l'une communique avec le pied métallique du vase; l'autre est approchée à volonté d'une machine électrique. L'eau ne s'élevant pas au-dessus de la boule inférieure, si l'on vient à faire jaillir une étincelle, on voit le niveau du liquide monter dans le vase étroit, et la hauteur à laquelle il s'élève est d'abord assez grande; elle diminue après que l'étincelle a passé.

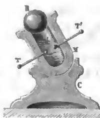


Fig. 272.



Fig. 273.

689. **Combinaisons produites par l'étincelle.** — Les effets chimiques produits par l'étincelle sont nombreux; aussi leur étude a-t-elle nécessité des expériences très-variées. Toutefois, dans la plupart des cas, il est difficile de dégager les phénomènes purement électriques de ceux qui sont produits par la chaleur que l'étincelle développe. Sans entrer dans des distinctions de ce genre, toujours fort délicates, nous donnerons simplement toutes les espèces d'effets observés, qui se rapportent nécessairement à deux ordres de phénomènes : ceux de combinaison et ceux de décomposition.

Comme exemple de combinaison, il convient d'abord de citer celle de l'oxygène et de l'hydrogène : l'eudiomètre est l'appareil qui convient le mieux pour la réaliser. Il se compose d'une éprouvette de verre E (*fig.* 274), à parois très-épaisses, dont le fond

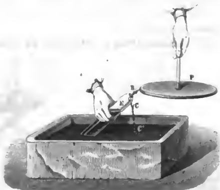


Fig. 274.

supérieur est traversé par une garniture métallique B terminée à l'extérieur par un bouton et pénétrant à peine dans l'intérieur. Latéralement une tige traverse la paroi, elle se termine en crochet C en dehors de l'éprouvette et à l'intérieur elle aboutit tout près de la garniture métallique. L'appareil plein de mercure est renversé sur la cuve : on introduit alors 1 volume d'hydrogène et 2 volumes d'oxygène et l'on bouche l'ouverture de l'eudiomètre. On voit la combinaison s'opérer avec dégagement de lumière, au moment où un corps électrisé quelconque est approché du bouton. Il faut toutefois, pour que l'étincelle jaillisse au sein de ce mélange, que le crochet soit relié à une chaîne de métal communiquant avec le sol.

689 *bis*. **Pistolet de Volta.** — L'expérience de la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène sous l'influence de l'étincelle électrique, a été répétée au moyen de toutes sortes d'instruments. Avec le pistolet de Volta (*fig.* 275), on peut combiner des quantités de gaz considérables et produire une forte détonation. Ce pistolet consiste en un vase de métal dont la paroi est traversée par une tige métallique isolée à l'aide d'un tube de verre et terminée en boule à ses deux extrémités. L'une des boules B est à l'extérieur, l'autre A à l'intérieur et tout près de l'un des points de la paroi. L'appareil plein du mélange et fermé par un bouchon est tenu à la main et porté à une petite distance d'une machine électrique, de telle façon que la boule B vienne en contact ou presque en contact avec la machine : la tige se charge d'électricité et entre elle et la paroi une étincelle jaillit. La combinaison des deux gaz a lieu sous l'influence de l'étincelle, et la vapeur d'eau qui se forme à une température élevée chasse vivement le bouchon en produisant une explosion.



Fig. 275.

690. **Inflammation de divers corps combustibles.** — Des phénomènes

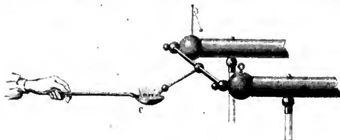


Fig. 276.

de même espèce se produisent, quand on fait jaillir une étincelle au-dessus de l'éther contenu dans une cuiller (*fig.* 276). L'étincelle met le feu au

mélange explosif formé par l'air et la vapeur d'éther, et l'éther liquide continue alors à brûler. La même expérience réussit avec la résine en poudre dont on saupoudre du coton (*fig.* 277), l'anneau métallique qui porte le coton est approché de la machine électrique, l'étincelle jaillit, la résine prend feu. L'expérience de l'inflammation de l'éther a été accueillie, la première fois qu'elle fut faite, comme un des phénomènes les plus extraordinaires; on ne pouvait cesser d'admirer le feu qui sortait du métal. Le phénomène fut rendu encore plus merveilleux par Klingeustierua qui produisit l'inflammation au moyen d'une aiguille de glace (*fig.* 278) tenue à la main. Mis en rapport avec la machine électrique et se tenant isolé sur un gâteau de résine, l'opérateur formait avec l'aiguille de glace comme un prolongement du conducteur de la machine. Dès que l'aiguille était voisine de l'éther, le liquide prenait feu.


Fig. 277.



Fig. 278.

691. **Formation d'acide azotique.** — Cavendish provoqua, au moyen de l'étincelle, la combinaison de l'azote et de l'oxygène. Les deux gaz sont introduits dans le tube à siphon T (*fig.* 279) dont chaque branche contient du mercure et plonge dans le mercure d'un vase de verre : en présence de ces gaz se trouve de l'eau ou mieux une dissolution de potasse. L'un des vases étant mis, par la tige B, en communication avec une machine électrique, l'autre, avec le sol, par la chaine C, des étincelles jaillissent à travers le mélange gazeux, quand la machine est en activité, et l'acide azotique se forme.



Fig. 279.

692. **Décomposition chimique.** — L'étincelle produit encore des phénomènes inverses des précédents, c'est-à-dire des phénomènes de décomposition. Que l'on place dans l'endiomètre de l'ammoniaque seule et que l'on fasse passer une série d'étincelles électriques, le gaz se décompose en azote et en hydrogène, et double de volume. Les gaz décomposés par

l'étincelle électrique ne sont pas nombreux : le plus souvent même la décomposition n'est que partielle.

MACHINES ÉLECTRIQUES

693. **Machine d'Otto de Guericke.** — La première machine qui servit à obtenir de l'électricité, par un moyen préférable à celui que nous avons donné jusqu'ici, consistait en un globe de soufre (*fig.* 280) auquel on donnait un mouvement de rotation. Les mains bien sèches étaient appliquées à la surface du globe et maintenues ensuite immobiles; un frottement avait lieu, dès qu'on donnait au globe un mouvement de rotation. L'électricité développée était recueillie sur un conducteur voisin soutenu par des fils de soie.

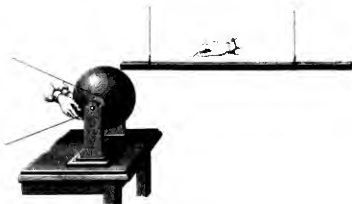


Fig. 280.

694. **Machine électrique à plateau.** — La machine employée le plus souvent pour nos expériences est la *machine à plateau de verre*. Elle se compose d'un plateau de verre circulaire P (*fig.* 281), que l'on fait tourner à l'aide d'une manivelle M, autour d'un axe qui le traverse en son centre et perpendiculairement à sa surface. Ce plateau en tournant frotte entre deux paires de coussins K, K' qui sont en contact avec lui par une large surface, mais sans exercer une très-forte pression. Par le frottement produit, les coussins se chargent d'électricité négative, que l'on ne conserve pas : elle disparait à mesure qu'elle est développée, car les coussins sont en communication avec le sol par des lames de métal M, M, réunies à la chaîne TT. Quant au plateau, il prend l'électricité positive que nous allons utiliser pour charger les conducteurs de la machine.

Ces conducteurs C et C' sont de grands cylindres métalliques creux,

Fig. 281.

qui sont portés sur des pieds de verre V, vernis à la gomme laque. Leur extrémité voisine du plateau porte des pièces recourbées F et F' (*fig.* 822), qui s'appellent les *mâchoires*, et sont armées de dents ou mieux de pointes, dont les extrémités se terminent très-près de chacune des faces du plateau. Lorsqu'une partie du plateau se place en regard des pointes, un phénomène d'influence se produit. Le fluide positif, dont le plateau est chargé, agit sur le fluide neutre des mâchoires et des conducteurs, attire le fluide négatif qui, s'écoulant par les pointes, neutralise le fluide positif du plateau :

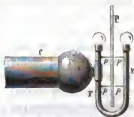


Fig. 282.

quant au fluide repoussé par cette influence, il reste et charge les conducteurs. Ainsi la machine est chargée d'électricité de même nom que celle du plateau tournant; mais ce n'est pas l'électricité du verre, qui est venue sur les conducteurs : ceux-ci n'acquièrent de l'électricité libre qu'à la suite d'une décomposition et d'une recomposition de fluide neutre.

Il semble que si l'on ne cesse pas de faire tourner le plateau de verre de la machine, la décomposition par influence doit se continuer sur le conducteur et que ce dernier, par suite, doit prendre une charge croissante. Il n'en est rien : la charge est, dans tous les cas, limitée. Il suffit, pour le concevoir, de remarquer, qu'à chaque nouveau tour, le plateau arrive à l'intérieur des mâchoires, avec une charge toujours la même; l'action répulsive que le fluide positif du plateau exerce sur une molécule du fluide positif, appartenant au fluide neutre du conducteur, est donc constante. Mais d'autre part, cette même molécule est soumise à l'action répulsive toujours croissante du fluide libre, qui s'accumule sur le conducteur. Il arrive donc nécessairement un moment où cette dernière force, qui agit en sens inverse de la première, lui est égale; alors la molécule considérée sera en équilibre et la décomposition par influence aura atteint sa limite. En réalité, la limite de charge dépend surtout de l'état de l'atmosphère dans le voisinage du conducteur; dans les temps très-humides, la perte par les supports et par l'air est considérable et la charge-limite faible.

Il est très-important, quand on veut tirer le meilleur parti possible d'une machine électrique, de sécher, avec le plus grand soin, le plateau, les supports de verre, les conducteurs eux-mêmes; aussi place-t-on habituellement, sur la table de l'appareil, un fourneau rempli de charbons allumés.

695. **Machine d'Armstrong.** — On doit à Armstrong la construction d'une machine, où le frottement de gouttelettes d'eau a été utilisé dans des conditions très-avantageuses. Les effets, qu'elle donne, sont incomparablement supérieurs à ceux que l'on avait obtenus par les machines électriques précédemment connues. Une chaudière (*fig.* 283) laisse échapper par des orifices *a* la vapeur, qui s'y trouve portée à une haute tension. Mais l'ensemble des conduits, par lesquels la vapeur est obligée de passer, est refroidi et une condensation partielle a lieu; si bien que des orifices *a* sort en réalité de la vapeur chargée de gouttelettes liquides. Par suite du frottement rapide et énergique de ces gouttelettes, que la vapeur entraîne en sortant, la chaudière se charge d'électricité négative et un peigne *v*, soutenu par un pied isolant et disposé au-devant des orifices, prend l'électricité des gouttelettes d'eau, électricité qui est positive. Une telle machine donne, presque d'une manière continue, des étincelles de plusieurs décimètres de long.

Le frottement des gouttelettes d'eau est bien la véritable cause de l'électricité développée : car si l'on emploie une disposition qui maintient les conduits à une haute température, si tout est préparé pour que la vapeur sorte à l'état sec, sans gouttelettes interposées, on ne trouve alors aucun développement d'électricité. D'ailleurs, le développement d'électricité est considérablement influencé par les changements apportés soit au liquide, soit au conduit. L'eau distillée donne les meilleurs effets ; l'eau ordinaire ne vaut rien, l'eau chargée de substances salines n'est pas meilleure ; une petite quantité d'essence de térébenthine introduite dans l'eau intervertit les deux électricités, le fluide négatif vient alors sur le peigne. Le bec d'échappement de la vapeur est-il en ivoire, la charge de la machine est nulle : le buis est préférable à toute autre substance.

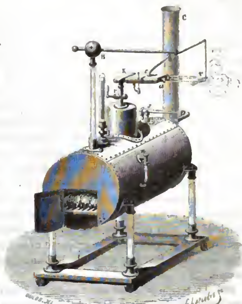


Fig. 283.

696. **Électrophore.** — L'électrophore inventé par Volta est un instrument, au moyen duquel on obtient l'électricité nécessaire à la plupart des expériences. Il est avantageux par la simplicité de sa construction, par son bas prix et par le peu de place qu'il occupe. Il se compose d'un gâteau de résine G (*fig.* 284), coulé dans une forme cylindrique qui sert à le protéger. Sur la surface supérieure du gâteau, qui est à découvert, on pose un plateau métallique P



Fig. 284.

ou, ce qui revient au même, un plateau de bois recouvert d'une feuille d'étain. Un manche de verre M s'élève du centre et sert à le soulever sans établir la communication avec le sol.

Pour charger l'instrument, on enlève le plateau métallique et l'on frotte la résine avec une peau de chat. Le meilleur mode de frottement consiste à battre cette résine de telle sorte que le coup frappé ne vienne pas d'aplomb, mais glisse en frappant. Le gâteau de résine frotté se charge d'électricité négative. Dès qu'il est chargé on pose sur lui le plateau métallique; les phénomènes d'influence ont lieu aussitôt : le fluide neutre du plateau est décomposé en partie, le fluide positif attiré vient à la partie inférieure, le fluide négatif repoussé s'en va sur la face supérieure. Si l'on soulevait alors le plateau par le manche isolant, les électricités séparées se recombineraient, et, à peu de distance de la résine, le plateau serait revenu à l'état naturel. Aussi opère-t-on autrement. Avant de soulever le plateau, on le met en communication avec le sol ; d'après ce que nous savons, le fluide négatif repoussé doit disparaître et le fluide positif attiré augmenter en quantité. On rompt la communication, le plateau reste alors chargé d'électricité de nom contraire à celle de la résine, c'est-à-dire d'électricité positive. On le soulève et on emporte avec lui le fluide positif libre. Le doigt approché tire une étincelle brillante quand l'électrophore est bien chargé.

697. La résine se brise assez aisément : un électrophore ne tarde pas à être fendu de tous côtés. Quand l'air est humide, il est nécessaire de sécher l'instrument. Dans ce but, on l'approche du feu; et c'est à ce moment que la résine se fendille à cause de sa mauvaise conductibilité. Depuis quelque temps, en Allemagne, on a utilisé un corps mauvais conducteur, peu hygrométrique, assez élastique : c'est le caoutchouc durci. L'électrophore se compose d'une plaque de ce caoutchouc (*fig.* 285) épaisse comme un cuir un peu fort. Sur cette plaque se pose le plateau métallique que l'on peut enlever par trois cordons de soie. Cet électrophore est beaucoup moins encombrant que le précédent, il fonctionne même par les temps les plus humides sans que l'on ait besoin de le sécher, et si on le place devant un foyer il ne court aucun risque de se briser.



Fig. 285.

ÉLECTROSCOPE A LAMES D'OR.

698. Un pendule électrique peut servir à reconnaître si un corps est électrisé et à déterminer de quelle électricité ce corps est chargé : nous en avons déjà donné beaucoup d'exemples. Mais, bien que la balle de sureau soit un corps léger, on a trouvé des corps plus légers encore qui se mettent en mouvement, sous l'influence d'une charge d'électricité incapable d'exercer une action appréciable sur le pendule ordinaire.

699. **Description de l'électroscope à lames d'or.** — Cet électroscope se compose de deux lames d'or L, L (*fig.* 286), longues, étroites, et d'une minceur excessive, qui les rend très-légères. Elles sont suspendues à l'extrémité inférieure d'une même tige et tombent en contact l'une avec l'autre. La tige qui les soutient se termine, à sa partie supérieure, par une boule B que l'on appelle le *bouton* de l'électroscope. Une cloche vernie à la gomme laque et posée sur un plateau métallique sert de pied isolant pour porter ce système, en même temps qu'elle protége les lames d'or contre les agitations de l'air. Sans cette protection, les lames seraient sans cesse en mouvement même dans un air d'apparence tranquille, tellement elles sont légères. Enfin, pour que les feuilles d'or conservent plus longtemps l'électricité dont on les charge, on place sous la cloche un corps capable de dessécher l'air : de la chaux vive ou du chlorure de calcium.


Fig. 286.

700. **Reconnaître si un corps est électrisé.** — Veut-on savoir si un corps est électrisé, on l'approche du bouton de l'électroscope. Si le corps est électrisé, il agit par influence sur le système conducteur formé par le bouton, la tige et les lames. Il attire vers le bouton l'électricité de nom contraire à la sienne, repousse dans les lames l'électricité de même nom : les lames chargées toutes deux de la même électricité se repoussent et divergent. Si le corps n'est pas chargé, aucune influence n'a lieu, aucune divergence ne se produit.

701. **Reconnaître de quelle électricité un corps est chargé.** — Deux moyens différents permettent de reconnaître la nature de l'électricité dont un corps est chargé.

Voici le premier : On charge d'abord l'électroscope d'une électricité connue. On approche par exemple, le bâton de résine frotté (*fig.* 287), les lames divergent : on touche le bouton avec le doigt, les lames se rap-

prochent, car l'instrument n'est plus chargé que sur le bouton, et il l'est d'électricité de nom contraire à celle de la résine, c'est-à-dire de fluide positif. On retire le doigt, puis toute communication de l'électroscope avec le sol étant ainsi supprimée, la résine est enlevée à son tour. Le fluide positif développé par influence se répand dans tout l'appareil (*fig.* 288) et les



Fig. 287.



Fig. 288.

lames divergent. De l'électroscope ainsi préparé on approche le corps que l'on veut éprouver, et l'on regarde les lames. Si leur divergence diminue, c'est que l'électricité du corps attire celle des lames : donc le corps approché est chargé d'électricité négative. Les lames au contraire divergent-elles davantage : le corps est chargé d'électricité positive.

702. La seconde méthode consiste à charger l'électroscope avec le corps électrisé lui-même. On opère avec le corps comme nous venons de le faire avec la résine (701) : bien que nous ne sachions pas la nature de l'électricité employée, nous pouvons affirmer cependant que l'électroscope se chargera d'une électricité contraire à celle du corps. On reconnaît ensuite la nature de l'électricité développée sur l'électroscope, soit au moyen d'un bâton de verre, soit au moyen du bâton de résine. Les raisonnements déjà faits montrent que si, par l'approche de la résine frottée, les lames divergent davantage, l'électroscope est chargé d'électricité négative, par conséquent le corps se trouvait électrisé positivement. Au contraire, si les lames se rapprochent, cela indiquera que le corps était chargé d'électricité négative.

703. **Erreurs à craindre.** — Chacune de ces méthodes porte avec elle une cause d'erreur, à laquelle il faut prendre garde. Dans la première méthode, par cela seul que l'on voit les lames se rapprocher, il ne faut pas

en conclure que le corps mis en présence soit nécessairement chargé d'électricité de nom contraire à celle que contient déjà l'électroscope. En effet, approchons la main non électrisée : l'électroscope chargé d'avance d'électricité positive par exemple, agira par influence, décomposera le fluide neutre de la main; le fluide négatif de cette dernière réagira à son tour sur l'instrument et produira un rapprochement des lames. Ainsi un corps non chargé d'électricité exerce une influence qui peut conduire à une fausse conclusion. Mais si, d'avance, on est sûr que le corps est chargé, si de plus on approche lentement la main et qu'on observe le premier effet, il n'y a rien à craindre de semblable.

704. Une erreur d'un autre genre doit être signalée, d'autant plus qu'elle peut être commise avec l'une ou l'autre méthode. Il arrive quelquefois que l'écartement des lames déjà chargées augmente, bien que l'on approche de l'appareil un corps contenant de l'électricité de nom contraire à celle qui s'y trouve déjà, c'est-à-dire une électricité qui devrait diminuer la divergence. Pour le faire comprendre, employons un bâton de résine fortement électrisé, et mettons-le en présence d'un électroscope dont les lames sont faiblement chargées d'électricité positive. Le premier effet de l'influence du bâton de résine sera d'attirer l'électricité des lames dans le bouton, et les lames retomberont l'une contre l'autre. Ensuite, si le bâton de résine est approché davantage, il produira une décomposition du fluide neutre, et les lames prendront une charge nouvelle, mais de fluide négatif : une divergence aura donc lieu et même pourra être plus considérable que la divergence primitive. Si donc on n'a pas fait une attention suffisante aux différentes phases de l'expérience, on croira, mais à tort, que l'électroscope était chargé d'électricité négative. On évite sûrement toute interprétation inexacte par un rapprochement lent du corps électrisé.

705. **Tiges de décharge.** — Les lames trop fortement électrisées se repousseraient avec une telle énergie, qu'elles viendraient frapper les parois de la cloche de verre et pourraient s'y coller : ce qui mettrait pendant un certain temps l'électroscope hors d'usage. On évite cet accident, en fixant, à la partie inférieure de l'électroscope, deux petites tiges de métal qui communiquent avec le sol et en les disposant de telle manière qu'au moment où l'écart des lames d'or devient trop grand, celles-ci soient nécessairement en contact avec les extrémités des tiges. Par ce moyen les lames se déchargent et l'électroscope est garanti.

On préfère le plus souvent que les lames affleurent les tiges, sans les toucher. La sûreté de l'instrument est moins grande, mais cependant il est rare que, dans ce cas, les lames s'écartent au delà de la limite voulue : elles sont retenues par l'électricité qu'elles développent par influence dans les tiges, et cette disposition a l'avantage de laisser l'appareil chargé.

CHAPITRE III

CONDENSATEURS

706. **Historique.** — En 1746, Cunéus, voulant électriser l'eau, en emplit, à moitié, une bouteille à large goulot (*fig.* 289), prit la bouteille à la main et fit pénétrer dans le liquide une tige métallique, qui était suspendue au conducteur d'une machine électrique. La machine se chargeait depuis

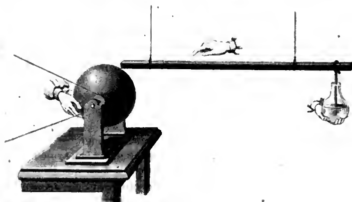


Fig 289.

un certain temps, lorsqu'avec la main libre il vint à toucher le conducteur, et aussitôt il ressentit une violente commotion. Muschenbroeck, son maître, répéta cette expérience, et la commotion qu'il reçut, fut si violente qu'il n'osa plus s'y exposer; il appela *électricité foudroyante* le fluide qui l'avait frappé.

L'expérience de Leyde fut répétée par un grand nombre de physiciens que n'effrayèrent pas les terreurs de Muschenbroeck. Parmi eux, l'on doit distinguer Le Monnier et l'abbé Nollet. La décharge que reçut l'abbé Nollet fut assez forte « pour lui faire plier le corps, lui couper la respiration; les « bras furent secoués et repoussés en haut au point de lui faire quitter le « vaisseau de verre qu'il tenait à la main. » On reconnut que plusieurs personnes pouvaient ressentir, en même temps, la commotion. En présence du roi, deux cent quarante gardes françaises, se tenant la main, formèrent une chaîne: le premier de la chaîne tint la bouteille, le dernier toucha le con-

ducteur au moment voulu et tous furent secoués à la fois. Il n'est pas besoin d'ajouter que les précautions étaient prises pour que la décharge ne laissât rien à désirer.

707. **Condensateur.** — On ne tarda pas à reconnaître, que, dans la bouteille de Leyde, l'eau et la main jouaient le rôle de deux corps conducteurs séparés par la lame isolante : toutes les fois que l'on construisit un appareil, où ces dispositions étaient réunies, des effets identiques à ceux de la bouteille de Leyde pouvaient être produits. Un tel assemblage de corps possède, comme on l'a reconnu, la propriété de condenser l'électricité, d'où lui est venu le nom de *condensateur*.


Fig. 290.

Le plus simple des condensateurs se compose (*fig.* 290) de deux plateaux de métal A et B et d'une lame de verre I. Chacun des plateaux porte un pendule *a* et *b*. Le plateau A est soutenu par un pied isolant, et muni d'un crochet C qui permet de le mettre en communication avec la machine électrique. Le plateau B peut être enlevé par un manche de verre. C'est avec cet appareil que nous allons exposer les points principaux de la théorie.

708. **Charge que peut acquérir un conducteur mis en communication avec une source d'électricité.** — Avant d'essayer de nous rendre compte des phénomènes que présente le condensateur, il faut nous occuper d'une étude préliminaire : il est nécessaire d'étudier la charge que la source donnerait au plateau A, s'il était seul, ou si du moins le plateau B se trouvait à une distance telle qu'il ne fît, pour ainsi dire, plus partie de l'appareil. Cette étude achevée, il sera facile de reconnaître l'effet produit par l'intervention de B, au moment où ce dernier plateau sera mis en place.

L'appareil réduit comme la figure 291 l'indique, est en communication par un conducteur CC′ avec une machine électrique, dont les pertes se réparent dès qu'elles ont lieu et que nous appellerons une *source constante*. Le plateau A, c'est un fait bien connu, se charge de la même électricité que la machine. Mais quelle est la limite de la charge? Elle est évidemment telle, qu'une molécule, soit de fluide positif, soit de fluide négatif,

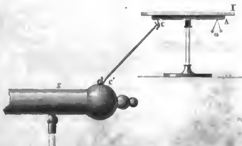


Fig. 291.

placée au point de contact C du conducteur CC' et du plateau, subisse une égale influence, d'une part, de l'électricité dont A est chargé, et d'autre part, de celle qui, se trouvant sur S et sur CC', agit en sens inverse. Tant que cela n'a pas lieu, cette molécule sera mise en mouvement par la force répulsive la plus grande : la charge de A subira des changements ; elle n'aura pas atteint sa limite.

709. **Première expérience avec le condensateur.** — Le conducteur CC' étant enlevé (*fig.* 292), on note la déviation des pendules que porte le plateau A, puis l'on approche le plateau B, en ayant soin de le tenir en communication avec le sol. Alors on voit que les pendules *a* se rapprochent, et cela d'autant plus que B est plus voisin.

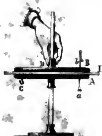


Fig. 292.

710. **Explication de cette expérience.** — Le phénomène que nous venons d'exposer est une conséquence immédiate de la théorie de l'influence. Le fluide positif de A décompose, en partie, le fluide neutre de B, repousse le fluide positif qui disparaît, et attire du fluide négatif qui vient vers la face du plateau B placée en contact avec la lame isolante. Ce fluide négatif à son tour réagit sur le fluide positif de A, en amenant une distribution nouvelle de ce fluide sur le plateau A. Avant que B n'eût été approché, le fluide positif était, par une raison de symétrie, en quantité égale sur les deux faces de A ; la présence de B, qui représente comme une source d'électricité négative, a pour effet de faire venir la majeure partie du fluide positif sur la face inférieure de la lame isolante. Ce fluide abandonne donc les pendules qui doivent alors cesser de diverger.

711. **Preuve expérimentale.** — Il est facile de démontrer que les choses se sont passées ainsi. Il suffit de retirer la communication qui a lieu entre B et le sol et d'éloigner le plateau B en le tenant par son manche isolant (*fig.* 293). On voit alors le pendule *a* diverger comme auparavant, et le pendule *b* diverger aussi. Le bâton de résine frotté permet de reconnaître que B est chargé d'électricité négative et que A n'a pas cessé d'être chargé d'électricité positive.

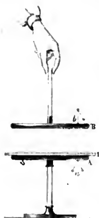


Fig. 293.

712. **Conséquences de cette première expérience.** — Par l'analyse qui vient d'être faite, il est reconnu que le plateau B s'est chargé d'électricité négative lorsque, placé sur la lame isolante, il était mis en communication avec le sol. Il est possible de tirer encore une conséquence de cette expérience fondamentale (709), c'est que

le plateau B est moins chargé que le plateau A. En effet, pour que l'équilibre des fluides eût lieu, il fallait que les deux actions exercées par A et B sur une molécule de fluide placée en D (*fig*. 292), au point où la communication avec le sol était établie, fussent égales; mais le fluide de A était le plus éloigné du point D, il fallait donc, pour qu'il y produisît une action égale, qu'il fût en plus grande quantité.

712 *bis*. Si la lame isolante est très-épaisse, le rapport des quantités sera un nombre très-différent de l'unité : mais à mesure que l'épaisseur des plateaux diminuera, ces deux quantités tendront vers l'égalité, sans jamais pourtant l'atteindre.

713. **Nouvelle conséquence.** — Que notre attention se reporte au point C (*fig*. 292) où le conducteur CC′ touchait à l'origine la face inférieure du plateau A. Quelles sont les actions qui s'exercent en ce point et qui tendent à éloigner du plateau une molécule de fluide positif ? Avant que B n'intervienne (708), il n'y a d'autre action que celle du fluide positif, qui se trouve sur le plateau A. Aussitôt qu'on approche B qui communique avec le sol (709), le fluide négatif qui se développe sur ce dernier plateau et qui attire le fluide positif de A, combat en sens contraire et détruit en partie la force répulsive qui avait limité la charge de A.

714. **Théorie du condensateur.** — De ceci, il résulte que, si l'on vient à rétablir la communication entre la source et le plateau A, par l'intermédiaire du conducteur CC′ (*fig*. 294) (la source étant chargée comme primitivement), il résulte, dis-je, que le fluide positif ne sera plus en équilibre en C et qu'il se portera vers le plateau A; le fluide négatif de C se portera vers la source. Par ces deux mouvements de fluide, la source perd une partie de son électricité; mais, nous l'avons dit, ses pertes se réparent de suite : il n'y a pas à s'en occuper. Ce qui mérite toute notre attention, c'est que le plateau A a pris une charge nouvelle : un commencement de condensation s'est opéré.

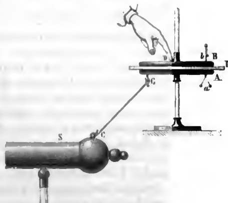


Fig. 294.

Les phénomènes ne s'arrêtent pas là : à mesure que le fluide positif de la source envahit le plateau A, ce fluide nouveau agit par influence sur le fluide neutre du plateau B, le décompose et provoque un nouveau développement de fluide négatif, qui réagit à son tour; les actions

et les réactions signalées plus haut se continuent ainsi indéfiniment.

715. **Limite de la charge.** — Les effets produits par ces actions et ces réactions successives sont tels que, chaque fois, la quantité de fluide positif qui arrive sur A l'emporte sur la quantité correspondante de fluide négatif qui se développe en B (712). Ainsi la résultante des actions répulsives, exercées sur la molécule C par les fluides des deux plateaux, s'accroît sans cesse; on comprend donc qu'elle deviendra égale à l'action répulsive constante exercée par le fluide de la source sur la même molécule. Quand cette égalité existera, le condensateur sera chargé au maximum; car la molécule C sera en équilibre (*).

715 *bis*. **Force condensante.** — La charge ayant atteint sa limite, si l'on compare la quantité d'électricité, que le plateau A contient, à celle dont il aurait été chargé, si le plateau B n'était pas intervenu, on obtient l'expression de ce qu'on a appelé la *force condensante* de l'instrument. Cette force condensante dépend, comme nous l'avons déjà vu (712 *bis*), de la distance des deux plateaux. Quand leur distance diminue, la force condensante augmente. Aussi, lorsque l'on désire une condensation énergique, a-t-on soin de prendre une lame isolante très-mince. Toutefois, le plus souvent on se trouve arrêté par la fragilité de la lame : les électricités de noms contraires, qui sont en regard, sur chacune des faces, s'attirent assez fortement pour la briser, quand la charge est puissante. Mais si la source est faible, une condensation énergique n'étant plus à craindre, on réduit la lame isolante à une feuille de mica ou même à quelques couches de vernis, dont l'épaisseur n'atteint pas $\frac{1}{100}$ de millimètre.

716. **Que doit-on entendre par l'expression Électricité dissimulée?** — Je suppose que l'on rompe au point D la communication établie avec le sol, et qu'après l'avoir rompue, on la rétablisse. Il est bien clair que ce rétablissement ne change rien : il ramène simplement les conditions primitives; l'électricité négative qui se trouve sur B, y reste comme avant le nouveau contact, aucun phénomène électrique ne se manifeste, tout se passe comme si l'appareil était à l'état naturel. Ce fait a conduit à dire que l'électricité de B était dissimulée par le fluide de nom contraire répandu sur A. Ce mot *dissimulée* exprime un fait vrai, mais il faut se garder de le mal comprendre. Pour déterminer le sens exact qu'on doit lui attribuer, recherchons dans quel état se trouvait l'appareil, avant que l'on eût supprimé la communication du plateau B avec le sol. Avant cette suppression les fluides électriques étaient en équilibre sur le plateau B : au point D,

(*) Dans la théorie du condensateur, nous avons toujours supposé le plateau B en communication avec le sol, parce que c'est toujours ainsi qu'on emploie l'instrument. Si B était isolé, le fluide positif qui resterait sur ce plateau s'opposerait, en partie, à l'action du fluide négatif et la condensation serait moins énergique.

spécialement, la résultante des actions exercées sur une molécule de fluide était nulle ; donc les fluides des deux plateaux agissaient avec la même puissance sur toute molécule d'électricité, qui s'y trouvait. Lorsque l'on ôte la communication et que l'on touche de nouveau, aucun mouvement électrique ne doit se manifester, parce que les deux actions contraires de A et de B continuent à être égales. En résumé, le fluide de B ne se manifeste pas dans les conditions de l'expérience, parce que les actions, qu'il exerce, sont combattues par des actions égales et contraires de A.

717. **Différence de charge des deux plateaux.** — De tout ce qui précède (715 et 716), il résulte que le fluide positif de A est en plus grande quantité que le fluide négatif de B, et qu'à égalité de distance il produirait des effets plus intenses.

718. **Décharges successives.** — De cette différence de charge (717), nous déduisons immédiatement, que sur un conducteur communiquant avec le sol et présenté en K à une petite distance du plateau A (*fig.* 295), une décomposition de fluide neutre a lieu ; l'action prédominante du fluide positif de A doit développer du fluide négatif sur ce conducteur, et repousser du fluide positif vers le sol. A mesure que le conducteur s'approchera, le dégagement de fluide deviendra plus grand, et quand il arrivera en contact avec A, le fluide négatif développé neutralisera une partie du fluide positif de A. La neutralisation se continuera, jusqu'à ce que l'action, exercée sur C par le fluide positif qui reste en A, soit égale à celle du fluide négatif de B ; alors le fluide qui existe, en un point quelconque du conducteur K, ne sera entraîné, ni dans un sens ni dans un autre.

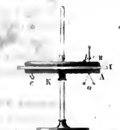


Fig. 295.

Cet équilibre nouveau établi, le fluide négatif de B doit être en quantité plus grande que le fluide positif qui demeure sur A après le contact. Il suit de là, que si on enlève le conducteur et qu'on lui fasse toucher le plateau B, l'action du fluide de B l'emportera sur l'action du fluide de A, et une partie du fluide négatif sera neutralisée : ce qui permettra d'enlever une nouvelle quantité du fluide de A, puis une nouvelle de B, et ainsi de suite. Le condensateur perdra son électricité par une succession de petites décharges alternativement produites en A et en B, et comme nous l'avons déjà expliqué, chacune de ces décharges donnera lieu à une étincelle.

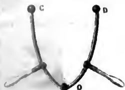


Fig. 296.

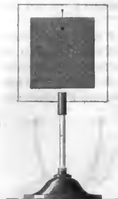
719. **Décharge instantanée.** — Prenons l'excitateur à manche de verre, qui est constitué, comme l'indique la figure 296, par deux tiges de cuivre D et C

mobiles autour d'une charnière au point O, et munies de manches en verre à l'aide desquels on tient l'excitateur. Touchons, avec l'extrémité D, un point du plateau B; aucun phénomène nouveau n'apparaît, nous le savons à l'avance. Approchons du plateau A, l'extrémité C de l'excitateur jusqu'au contact, tout en laissant D dans sa position primitive : un mouvement d'électricité aura lieu dans l'arc excitateur; la boule C soumise à l'influence prédominante de A se chargera d'électricité négative, et aussi sous cette influence de l'électricité positive sera repoussée vers D. De là, une perturbation de l'équilibre des fluides des deux plateaux, une neutralisation d'abord partielle du fluide de A, puis du fluide de B, et ainsi, par un mouvement continu d'électricité sur l'arc interposé, une série de décharges amènera la décharge complète. Il ne restera sur l'appareil que le fluide positif en excès.

En fait, les décharges partielles dont nous venons d'indiquer la production s'opèrent dans un temps d'une durée trop petite pour être appréciée : en outre, quand le condensateur est suffisamment chargé, une étincelle jaillit toujours avant que l'excitateur ne touche les deux plateaux; cette étincelle fait disparaître presque toute l'électricité de l'appareil; au contact, la décharge est plus complète.

Lorsque l'excitateur n'est pas isolé, les mêmes phénomènes ont lieu, sauf que le condensateur ne conserve plus aucune trace d'électricité après le contact.

720. **Mouvement d'électricité sur l'excitateur.** — La théorie, que nous venons de donner, montre que, pendant la décharge, il y a, sur l'excitateur ou sur le conducteur intermédiaire, deux mouvements d'électricité en sens inverse l'un de l'autre, exactement comme cela a lieu pour les corps soumis à l'influence. Et l'on voit aussi, qu'il est inexact de dire que les électricités du condensateur se réunissent par l'intermédiaire de l'arc métallique interposé. En réalité, ce sont les fluides de l'excitateur qui viennent se combiner avec ceux qui composent la charge des plateaux.


Fig. 297.

721. **Carreau de Leyde.** — On donne le nom de *carreau de Leyde* à un condensateur formé d'une simple lame de verre (*fig.* 297), dont les deux faces sont recouvertes chacune d'une feuille d'étain : c'est exactement le condensateur que nous avons employé tout à l'heure, seulement les lames métalliques ont ici une épaisseur très-petite. Avec cet appareil facile à construire, on peut reproduire toutes les expériences signalées précédemment. Il a un avantage : il prend une charge plus considérable que notre

premier condensateur ; cela tient à ce que les lames collées sur le verre sont plus rapprochées l'une de l'autre que nos plateaux A et B. Aussi, quand on décharge ce condensateur, obtient-on une magnifique étincelle.

722. **Bouteille de Leyde.** — La bouteille de Leyde (*fig.* 298) est aujourd'hui formée par un flacon à col étroit, qui contient des feuilles d'étain et de clinquant. Celles-ci représentent, par leur ensemble, le plateau métallique A du condensateur ordinaire. Elles communiquent avec l'extérieur par l'intermédiaire d'une tige de métal portant une boule à l'une de ses extrémités ; cette tige pénètre au milieu des feuilles de clinquant et se trouve fixée au goulot par un bouchon. La surface latérale de la bouteille est recouverte, presque jusqu'au goulot, d'une feuille d'étain, qui recouvre aussi le fond, cette feuille tient la place du plateau B. On donne le nom d'*armures* aux corps conducteurs qui sont ainsi séparés par la lame isolante. Pour que les deux armures soient bien isolées l'une de l'autre, on a soin de vernir le goulot et même le haut de la bouteille.



Fig. 298.

Pour charger une bouteille, on tient en général l'armure extérieure à la main, on met l'armure intérieure en communication pendant un temps suffisant avec une machine électrique en activité. La bouteille peut être ensuite écartée ; on est sûr qu'elle a atteint sa large limite, lorsque le petit pendule mobile que porte habituellement la machine a pris son écart maximum. La figure 299 montre une des méthodes employées pour la décharger. L'excitateur BB' est entièrement métallique et la décharge a lieu sans donner de commotion à celui qui le tient, pourvu que le contact soit établi d'abord en B' avec l'armure extérieure. La décharge passe à travers le métal dont la conductibilité est très-supérieure à celle du corps de l'homme.



Fig. 299.

723. **Expériences de Franklin.** — A peine la bouteille de Leyde venait-elle d'être découverte, que Franklin parvint à établir les premières bases expérimentales de la théorie qui en explique les effets. En opérant successivement sur chacune des armures, il reconnut qu'elles étaient chargées de deux espèces d'électricité. Ses premiers essais seront actuellement pour nous très-faciles à comprendre.

Il approcha une balle de moelle de sureau C soutenue par un fil de soie

de l'armure intérieure A : cette balle après le contact était repoussée, mais approchée alors de l'armure B, elle était attirée, puis repoussée, et l'expérience pouvait être répétée un grand nombre de fois. La figure 300 représente la balle de sureau C soutenue par un fil de soie entre deux boules A et B qui sont en rapport avec les deux armures : quand la bouteille est chargée, la balle C oscille en frappant A et B.

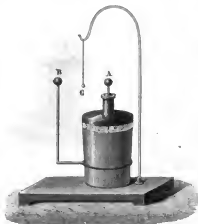


Fig. 300.

Parmi les nombreuses expériences de Franklin, nous citerons encore la suivante : un homme porté sur un gâteau de résine prit à la main l'armure extérieure d'une bouteille de Leyde, et dès qu'une personne eut touché l'armure intérieure, celui qui tenait la bouteille se trouva chargé d'électricité de nom contraire à celle de la source. Ce résultat a été expliqué (718).

724. Figures de Lichtenberg. — Une autre expérience qui fait reconnaître d'une manière assez nette que les deux armures d'une bouteille de Leyde sont chargées d'électricité de noms contraires, c'est l'expérience des figures de Lichtenberg (*fig.* 301). Sur un gâteau de résine, on promène le bouton de la bouteille chargée de manière à tracer la lettre *P*, par exemple ; puis on pose cette bouteille sur un corps isolant. On la saisit par le bouton et avec l'armure extérieure, on trace d'autres traits, par exemple, la lettre *N*. Veut-on reconnaître que les deux armures ont laissé sur le gâteau de résine chacune une électricité différente, on emploie un mélange pulvérulent formé de soufre et de minium, qui est introduit dans un soufflet. Chassées du soufflet, les deux poudres frottent l'une contre l'autre, s'électrisent et se répandent comme un nuage de poussière à la surface du gâteau de résine ; le soufre, que le frottement a chargé d'électricité négative, se rend là où le bouton de la bouteille a passé, il dessine en jaune la lettre *P* tracée en premier lieu, le minium, chargé d'électricité positive, dessine en rouge la lettre *N* tracée en second lieu.


Fig. 301.

724 *bis*. Les électricités se portent sur la lame isolante. — Où réside l'électricité d'une bouteille de Leyde ? Telle est la question que Franklin s'est posée et qu'il a résolue d'une manière élégante. A cet effet il se

servait, comme bouteille de Leyde, d'une bouteille pleine d'eau qu'il tenait à la main; l'eau remplissait l'office de l'armure intérieure, et la main, celui de l'armure extérieure. Quand la bouteille fut chargée, on fit écouler dans un vase l'eau qu'elle contenait, cette eau ne parut pas électrisée. On remplit alors la bouteille d'eau nouvelle, et l'étincelle jaillit entre les deux armures, par l'emploi de l'excitateur.

Franklin répéta l'expérience avec le même succès, en se servant d'un carreau de Leyde, dont les armures étaient mobiles. Aujourd'hui on la reproduit dans les cours de physique en rendant mobiles, dans la bouteille de Leyde, les armures et la lame isolante (*fig.* 302). L'appareil se compose :



Fig. 302.

1° d'un vase métallique en forme de timbale B; 2° d'un verre un peu évasé I, placé à l'intérieur; 3° d'un cylindre métallique A armé d'un crochet à bouton, qui constitue l'armure intérieure, car ce cylindre est placé dans le vase de verre. La bouteille construite est chargée à la façon ordinaire, puis posée sur un gâteau de résine. On enlève, au moyen d'un crochet de verre, l'armure intérieure, puis le vase de verre, et on touche les deux armures ainsi séparées. On reconstruit ensuite la bouteille et on trouve qu'elle est chargée. Ainsi donc l'électricité n'était pas sur les métaux, elle résidait sur la substance isolante.

725. **Batterie.** — La grandeur des bouteilles a une limite qu'on ne peut dépasser; on doit à Franklin d'avoir imaginé d'associer entre elles plusieurs bouteilles de Leyde de manière à constituer par leur ensemble un condensateur à très-large surface. Les *batteries* sont, en général, composées de neuf bouteilles très-grandes (*fig.* 303), qui sont placées dans une boite recouverte d'une feuille métallique, si bien que toutes les armures extérieures sont réunies entre elles. On fait communiquer ces armures avec le sol par une chaîne métallique attachée à la poignée P, qui est réunie avec la feuille métallique de l'intérieur de la boîte; quant aux armures intérieures, elles communiquent ensemble par des tiges, qui

aboutissent toutes au bouton de la bouteille centrale; un pendule placé sur une des bouteilles fait connaître la charge de la batterie.

Pour charger une batterie on met les armures intérieures en communi-

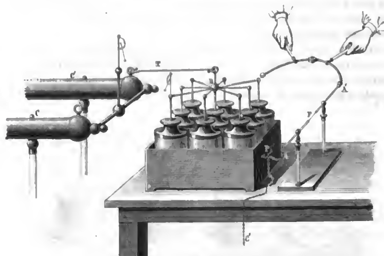


Fig. 303.

cation avec la machine et la chaîne en contact avec le sol. L'appareil se charge comme une bouteille de Leyde ordinaire.

726. **Diverses expériences.** — Avec la batterie on peut montrer, mieux qu'avec tout autre condensateur, l'effet produit par une grande quantité d'électricité qui traverse les corps.

Première expérience. — Un fil métallique très-fin F, est tendu d'avance (*fig.* 303), entre deux tiges de métal A et A' soutenues sur des colonnes de verre; l'une des tiges A touche l'armure extérieure d'une batterie que l'on charge. Dès que la charge est suffisante, on réunit la seconde tige A' et l'armure intérieure de la batterie par un excitateur à manches de verre; la batterie se décharge à travers l'ensemble formé par les tiges métalliques, le fil très-fin et l'excitateur. Dans cet ensemble ont donc lieu ces mouvements d'électricité, qui ont été déjà signalés, et le fil ainsi parcouru par les fluides s'échauffe, rougit, fond et même éclate en vives étincelles, quand il est combustible comme le fer.

Deuxième expérience. — Au lieu de faire passer la décharge à travers un fil fin, si on lui fait traverser une feuille métallique très-mince, telle qu'une feuille d'or battu, les mêmes phénomènes ont lieu. Un ruban de soie mis sous la feuille d'or se recouvre, après la décharge, d'une poudre noire formée par l'or volatilisé. On a l'habitude, en répétant cette expé-

rience dans les cours, d'en prendre occasion pour rendre un hommage à la mémoire de Franklin. On place la feuille d'or sur une découpure représentant le portrait de Franklin (*fig.* 304); au-dessous de la découpure, on met un ruban de soie, on serre le tout entre des presses. Quand la décharge passe, l'or se volatilise, la vapeur d'or brunit le ruban, et le portrait de Franklin est *peint par la foudre*, comme l'indique la légende qui entoure le portrait.



Fig. 304.

Troisième expérience. — Les corps mauvais conducteurs sont brisés quand ils se trouvent sur le trajet de la décharge d'une batterie. T et T' représentent deux pointes dont l'une est mise en communication avec l'armure extérieure d'une batterie : entre elles sont placées des cartes à jouer. Aussitôt que la seconde pointe est réunie avec l'armure intérieure par l'intermédiaire de l'excitateur, la décharge a lieu malgré l'interposition des cartes qui conduisent mal l'électricité. Aussi les trouve-t-on percées d'un trou là où l'étincelle a passé. L'expérience réussit même avec une seule bouteille de Leyde ; la figure 305 la représente dans ces conditions.

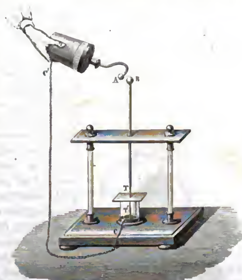


Fig. 305.

Quatrième expérience. — Une quatrième expérience, qui réussit avec une très-forte batterie, consiste à mettre sur le trajet de la décharge du sable fin reposant sur une plaque métallique. On fait passer la décharge entre une pointe et la plaque métallique, et l'on voit que sur le

trajet de l'étincelle le sable s'agglutine, fond, et forme un petit tube solide d'apparence vitreuse.

726 *bis*. **Transmission de l'électricité à distance.** — Il n'est pas possible de quitter ce sujet sans signaler l'expérience par laquelle Franklin parvint à transmettre l'étincelle électrique à de grandes distances. De l'une des rives du Skuylkill, qui coule auprès de Philadelphie, il alluma

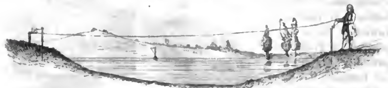


Fig. 306.

de l'éther placé sur l'autre rive. Deux pieux métalliques (*fig.* 306) furent enfoncés en terre; l'un d'eux portait un prolongement, qui se rendait au-dessus d'une cuiller de métal isolée et contenant de l'éther. Un fil soutenu au-dessus du fleuve allait de la cuiller à l'armure extérieure d'une bouteille de Leyde que tenait l'expérimentateur *porté sur un gâteau de résine*. Le second pieu ayant été mis en rapport avec l'armure extérieure, une étincelle jaillit au-dessus de l'éther qui s'enflamma.

727. **Électroscope condensateur.** — Volta appliqua la théorie du condensateur à l'électroscope et construisit un appareil, au moyen duquel il est possible de constater l'électricité fournie par une source trop faible pour que l'électroscope ordinaire puisse servir à la reconnaître. Nous disons *source;* cela veut dire un corps ou un ensemble de corps, qui, dans les expériences auxquelles on les emploie, resteront toujours ou bien chargés de la même quantité d'électricité, ou bien encore ne perdront qu'une portion d'électricité si petite, par rapport à celle qu'ils possèdent, que l'on pourra toujours les considérer comme contenant la même charge qu'au début.



Fig. 307.

Cet instrument est un électroscope à lames d'or (*fig.* 307), mais, à la place du bouton, est vissé un premier plateau métallique, au-dessus duquel on en pose un second, séparé du précédent par une lame isolante. Afin que la condensation se fasse très-énergiquement (ce qui est nécessaire dans le cas actuel,

puisque l'on veut reconnaître les sources d'électricité très-faibles), Volta se servait comme lame isolante de deux couches minces de vernis appliquées l'une à la face supérieure du premier plateau, et l'autre à la face inférieure du second.

Pour se servir de l'appareil, on met la source en contact avec l'un des plateaux, le plateau supérieur par exemple; le plateau inférieur est mis en communication avec le sol. La condensation se fait, et en retirant le doigt, puis le plateau supérieur, les lames divergent chargées par l'électricité du plateau inférieur qui s'y répand. On peut reconnaître quelle espèce d'électricité se trouve sur les lames, en se servant du procédé employé avec l'électroscope ordinaire; mais il ne faut pas oublier que les lames sont chargées d'électricité de nom contraire à celle de la source, du moins quand on opère, ainsi que nous l'avons fait, en mettant la source en contact avec le plateau supérieur.

CHAPITRE IV

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

728. — **Premières idées sur l'identité entre la foudre et l'électricité. — Expérience de Dalibard.** — A peine les premiers effets de l'étincelle électrique étaient-ils connus, que les physiciens firent de suite la comparaison entre l'électricité et la foudre. Il leur sembla que « les phénomènes électriques sont, comme le disait l'abbé Nollet, de petites imitations de ces grands phénomènes qui nous effrayent, et qu'une nuée est vis-à-vis d'un objet terrestre, ce qu'est le corps électrisé en présence de celui qui ne l'est pas. » Mais toutes les analogies constatées n'apportaient que des présomptions en faveur de l'opinion qui attribuait les deux ordres de phénomènes à une même cause : il fallait des preuves. C'est Franklin qui indiqua la méthode à suivre, et c'est Dalibard qui démontra d'une manière irréfutable l'identité si longtemps soupçonnée. Dalibard réussit à s'emparer de la foudre et la fit servir à répéter toutes les expériences d'électricité alors connues.

Il profita du pouvoir des pointes, comme Franklin l'avait conseillé ; il fit dresser à Marly-la-Ville une barre métallique isolée et très-aiguë à sa partie supérieure. La partie inférieure, terminée par une boule, pouvait être mise en communication avec divers appareils. Un nuage orageux ayant passé au-dessus de la pointe, l'extrémité inférieure de la barre se

chargea exactement comme si la pointe avait été en présence d'une machine électrique : on en tirait des étincelles.

729. **Expériences de Franklin et de Romas.** — En 1752, Franklin tenta des expériences du même genre; mais comme le clocher de Philadelphie, sur lequel il voulait élever une barre de métal, tardait à s'achever, Franklin, impatient de soumettre ses idées théoriques à une vérification expérimentale, lança dans les airs un cerf-volant armé d'une pointe métallique. La corde du cerf-volant, qui communiquait avec la tige de métal, se terminait par un cordon de soie, que l'observateur tenait à la main. Un premier nuage orageux passa sans donner d'effet, la corde de chanvre ne conduisant pas assez bien l'électricité; mais une petite pluie survint, mouilla la corde, et Franklin put en tirer des étincelles.

Que la corde ait mal conduit l'électricité, ce fut un grand bonheur pour le célèbre physicien, car les expériences de de Romas, exécutées un peu plus tard, montrèrent tous les dangers que comportait ce genre de tentatives. De Romas s'étant servi pour enlever son cerf-volant d'une corde filée, analogue aux cordes métalliques des violons, put tirer des étincelles de plusieurs pieds de longueur, qui éclataient avec un bruit effrayant. Heureusement, dans la prévision de ces puissants effets, le prudent expérimentateur avait soutenu la corde au moyen d'un treuil de verre porté par un chariot mobile; des pieux métalliques formaient une enceinte où il s'interdisait d'entrer, et en même temps un excitateur convenable servait à établir la communication entre le sol et la corde conductrice. La mort de Richmann, qui, n'ayant pas pris les précautions nécessaires, fut foudroyé dans des circonstances semblables, vint avertir, d'une manière cruelle, des périls qu'entraînent ces expériences.

730. **Méthodes actuelles d'observation.** — L'appareil d'expérimentation de Marly-la-Ville, qui a servi à établir l'identité entre la foudre et l'électricité, est mis à profit encore aujourd'hui, mais sous une autre forme, pour étudier l'électricité dont l'atmosphère est chargée. Dans les observatoires, des pointes élevées sont disposées comme celle de Marly-la-Ville, et des électroscopes mis en communication avec l'extrémité inférieure de ces pointes permettent de déterminer la nature et l'intensité de la charge. Pour éviter le malheur de Richmann, une tige métallique mise en communication avec le sol est disposée très-près de la barre métallique, qui ne peut dès lors garder qu'une charge dont il n'y a rien à craindre. Ces appareils fixes ne servent qu'aux observatoires. Dans les voyages, on emploie des électroscopes à lames d'or, dont une tige aiguë remplace le bouton fixé d'habitude à ces instruments; ou bien encore, comme l'a fait M. Becquerel, on va puiser l'électricité dans la portion élevée de l'atmosphère, en lançant verticalement une flèche métallique communiquant par une corde conductrice à la tige de l'électroscope. A mesure que

la flèche s'élève, la corde se déroule, et quand elle est à sa fin, elle quitte l'électroscope auquel elle n'est retenue que par un anneau.

731. **Carillon électrique.** — Canton, qui faisait des expériences d'électricité atmosphérique, fatigué de surveiller constamment les appareils pour saisir les instants où ils se chargeaient, imagina une petite sonnerie qui devait se faire entendre, dès que l'électricité apparaîtrait : c'est le *carillon électrique*. Cet appareil (*fig.* 308) est formé de trois timbres T,T',T'' portés par une traverse métallique AA'; le timbre du milieu, mis en communication avec le sol par une chaîne conductrice C, est suspendu à un fil de soie : les timbres extrêmes sont suspendus à de petites chaînes de métal. Entre eux sont de petites balles métalliques soutenues au moyen de fils de soie. Si l'on attache la traverse à l'extrémité inférieure de la barre terminée en pointe, qui s'élève dans l'air, les balles seront attirées par les timbres extrêmes quand la barre se chargera, elles frapperont sur les timbres, puis seront aussitôt repoussées et frapperont sur le timbre du milieu où elles perdront leur électricité. Alors, attirées de nouveau par les timbres extrêmes, elles continueront indéfiniment leurs mouvements. Cet appareil est ingénieux ; mais, il ne faut pas s'y tromper, il ne peut signaler que des charges électriques bien supérieures à celles qui agiraient déjà sur un électroscope ordinaire.

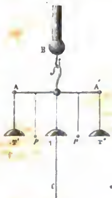


Fig. 308.

732. **Résultats.** — On reconnait avec des électroscopes sensibles, que l'air est presque toujours chargé d'électricité. Cette électrisation peut être constatée non-seulement quand l'atmosphère est nuageuse, mais encore au moment où le ciel est parfaitement serein ; toujours ou presque toujours les lames de l'électroscope divergent. Par un temps serein, l'électricité est toujours positive ; et pendant les belles journées, une assez grande régularité s'observe dans les variations de l'état électrique de l'atmosphère. Le plus souvent on trouve un minimum à 2 heures, un maximum à 10 heures du matin, un second minimum à 2 heures après midi, et un nouveau maximum à 10 heures du soir. On observe en outre que les signes d'électricité atmosphérique sont d'autant plus sensibles que l'on s'élève davantage. Cela tient à ce que les couches inférieures étant toujours humides et par suite conductrices, perdent peu à peu leur fluide par leur communication avec le sol. Par les temps orageux, il est évident d'avance que l'état électrique ne doit présenter aucune régularité, mais, en outre, on trouve que les nuages sont chargés, tantôt d'électricité positive, tantôt d'électricité négative. Enfin, un fait qui peut surprendre, c'est que les déviations de l'électroscope sont moindres pendant l'été que pendant l'hiver. En apparence,

ce résultat est en contradiction avec ce fait parfaitement connu que, dans nos pays, les orages n'ont guère lieu qu'en été; mais la contradiction disparaît, si l'on remarque que pendant l'hiver, l'air est humide et que l'électricité, qui s'y trouve, s'écoule plus facilement dans le sol à travers les couches inférieures de l'atmosphère rendues plus conductrices; tandis que pendant l'été, l'air est sec et l'électricité des hautes régions ne peut franchir l'air mauvais conducteur que sous la forme d'étincelles.

733. **Causes de l'électricité atmosphérique.** — Les causes de l'électricité atmosphérique ne sont pas connues; il semble toutefois que l'on doit considérer l'évaporation de l'eau comme la cause principale de son développement. M. Pouillet a montré que l'eau, chargée de sel, dégage les deux électricités, quand elle se réduit en vapeur : l'électricité positive s'échappe avec la vapeur, et l'électricité négative reste sur le vase où l'évaporation a lieu. Pour le prouver, M. Pouillet adapte à l'un des plateaux de l'électroscope condensateur un anneau, qui supporte un creuset chauffé à une très-haute température. Quelques gouttes d'eau salée sont-elles versées dans le creuset, elles s'évaporent et le plateau reste chargé d'électricité négative. Mais comme les deux électricités se développent toujours simultanément, il en résulte que la vapeur, en se dégageant, a emporté avec elle l'électricité positive.

734. — Cette expérience n'est pas complétement démonstrative : l'eau, qui tombe, prend l'état sphéroïdal, elle ne s'évapore abondamment qu'au moment où elle vient à mouiller le creuset refroidi, et alors elle décrépite et des gouttelettes sont projetées en frottant contre les parois du vase. Deux physiciens allemands, M. Riess d'une part, et M. Reich de l'autre, ont répété ces expériences, et ils n'ont trouvé aucun développement d'électricité, toutes les fois que le creuset n'était pas chauffé jusqu'à produire l'état sphéroïdal de l'eau. La charge ne commence à être manifeste que lorsque la température s'abaisse et que des gouttelettes projetées de tous côtés frottent les parois du vase. Si l'on évite le frottement des gouttelettes d'eau, on n'aperçoit aucun signe d'électricité.

Malgré l'exactitude non douteuse des expériences des deux physiciens allemands, il est difficile d'admettre qu'un phénomène, comme celui de l'évaporation ne produise aucun dégagement d'électricité, quand on voit par des expériences sans nombre, que toute modification physique, imprimée à un corps, produit un dégagement semblable. Peut-être faudrait-il des instruments plus sensibles que l'électroscope pour arriver à des résultats incontestables.

735. **Nuages orageux électrisés positivement et négativement.** — Quoi qu'il en soit, quand le ciel est débarrassé de nuages, l'électricité est toujours positive; dès lors on comprend que les nuages en se formant doivent se charger de l'électricité positive contenue dans l'atmosphère; mais

ce que l'on n'a pas compris tout d'abord c'est comment il se forme des nuages chargés d'électricité négative; aujourd'hui l'on s'en rend assez bien compte. Qu'un nuage faiblement électrisé se trouve au-dessous d'un nuage très-fortement chargé, des phénomènes d'influence auront lieu; l'électricité positive du nuage le plus faible sera repoussée tout entière; puis une décomposition de fluide neutre se fera, et sur le nuage le plus faible se développera du fluide négatif. Alors que, par une cause quelconque, ce nuage ainsi influencé soit en communication avec le sol; si, par exemple, il touche le flanc d'une montagne, il perdra son électricité positive libre et se trouvera chargé d'électricité négative.

Voici une preuve de la vérité de cette théorie. Quand par un jour serein on lance un jet d'eau à une grande hauteur dans l'atmosphère, les gouttes, qui tombent, sont chargées d'électricité négative : on le constate, en les recevant sur un électroscope.

736. **Éclair.**— De tout ce qui précède, il résulte que l'éclair n'est qu'une étincelle électrique, jaillissant soit entre le nuage électrisé et la terre, soit encore entre deux nuages orageux. L'identité des phénomènes une fois reconnue, en théorie il ne reste rien à ajouter à notre étude de l'étincelle ; toutefois l'éclair présente des particularités qu'il est indispensable de signaler.

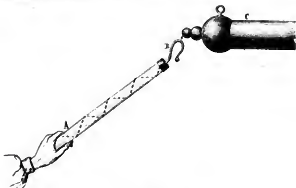


Fig. 309.

Longueur. — Un fait qui a toujours étonné, c'est l'immense longueur des éclairs, qui est quelquefois de plusieurs lieues. Il est, en effet, difficile d'admettre, que deux nuages soient assez fortement électrisés, pour qu'une couche d'air de plusieurs lieues d'épaisseur soit rompue par l'action attractive des deux fluides, qui tendent à se réunir. Mais la longueur de l'éclair s'explique par la présence d'une multitude de petits corps conducteurs interposés entre les deux points de départ, à savoir : des gouttes d'eau qui tombent et des lambeaux de nuages détachés. Tous

ces conducteurs se trouvent soumis à l'influence successive, exactement comme cela aurait lieu pour une série de cylindres placés à la suite les uns des autres (677) et dont les deux extrêmes seraient chargés. Une étincelle apparaît entre chaque conducteur et celui qui le précède ; si les conducteurs ne sont pas de grande dimension, cette myriade d'étincelles constitue pour l'œil comme une étincelle unique.

On reproduit ce phénomène en petit dans les laboratoires, en se servant d'un tube de verre AB (*fig.* 309), sur lequel sont collées en spirale, l'une à la suite de l'autre, de petites feuilles d'étain. Quand on tient l'un des bouts du tube à la main et que l'on approche l'autre extrémité d'une machine électrique chargée, une étincelle jaillit entre chaque lame et celles qui en sont voisines; le spectateur, placé un peu loin, croit apercevoir une seule étincelle d'une grande longueur.

Forme. — L'éclair affecte d'ailleurs, le plus souvent, la forme sinueuse en zigzag, que présente l'étincelle d'une machine électrique, quand on place la main à une certaine distance du conducteur.

Durée. — La courte durée de l'éclair est devenue proverbiale, et nulle expression ne convient mieux pour exprimer un phénomène rapide ; car un éclair dure moins qu'un millionnième de seconde. Les expériences de Wheatstone ont mis le fait hors de doute; et si tout le monde ne peut pas répéter l'expérience de Wheatstone, tout le monde peut du moins observer des phénomènes, qui la renferment en principe et qui ont été sans aucun doute les occasions qui l'ont provoquée. Au moment où l'éclair jaillit, les yeux, qui se portent sur des corps en mouvement, les aperçoivent dans une immobilité complète ; les chevaux emportés au grand galop, la voiture qu'ils traînent, les roues qui tournent, tout enfin est saisi comme au repos ; la durée de l'éclair a donc été tellement courte que pas un objet, pas un animal n'a eu le temps de prendre un déplacement sensible.

Wheatstone a construit un instrument, qui lui a permis non-seulement d'observer le fait, mais aussi de le mesurer. Il se servait d'une roue qu'il faisait tourner autour d'un axe avec rapidité ; chaque rayon décrivait d'abord un chemin appréciable en un millième de seconde ; puis la vitesse de rotation fut rendue dix, cent fois plus grande, si bien qu'en dernier lieu, un rayon se déplaçait d'une quantité notable pendant l'intervalle de temps mesuré par *millionnième* de seconde seulement. Cette roue fut observée à diverses reprises par Wheatstone, lorsque l'éclair jaillissait et illuminait subitement les objets placés dans une obscurité profonde, et la durée de l'éclair était si courte qu'il ne lui fut pas possible d'observer le moindre mouvement des rayons.

737. **Éclairs de diverses espèces.** — Cependant, il est des éclairs, qui paraissent comme des lueurs incertaines, persistant pendant une durée très-appréciable qui peut monter à plus d'une seconde. Ils ne sont probablement

que la succession de plusieurs éclairs, apparaissant à des intervalles de moins d'un dixième de seconde, et dont la lueur nous semble continue. Plus d'une fois, nous avons eu l'occasion d'observer ce phénomène.

On connaît enfin une troisième variété d'éclairs se montrant beaucoup plus rarement que les précédents : ce sont les *éclairs en boule*. Les récits des circonstances de leur apparition sont aujourd'hui assez nombreux et assez authentiques, pour qu'il ne soit plus possible de douter de leur réalité. Les phénomènes auxquels ils donnent naissance sont tout à fait inexplicables dans l'état actuel de la science : on a vu, dans quelques cas, une boule de feu arriver dans le voisinage du sol, se porter à droite, à gauche, d'une manière en apparence très-capricieuse, et cela avec une vitesse assez petite. Habituellement, après s'être ainsi déplacée pendant un certain temps, la boule éclate en produisant une violente explosion, elle foudroie les objets voisins et laisse, autour d'elle, cette odeur caractéristique qui accompagne la foudre.

738. **Tonnerre.** — Le tonnerre n'est que le bruit produit par les couches d'air violemment déplacées par l'éclair et revenant très-vite sur elles-mêmes : c'est en grand le bruit de l'étincelle électrique. Quelquefois mais rarement, le coup est sec; le plus souvent, c'est un roulement qui gronde, puis éclate tout à coup, s'apaise, éclate et gronde plusieurs fois de nouveau, jusqu'à ce qu'enfin tout bruit cesse. Ordinairement le tonnerre éclate à nos oreilles plusieurs secondes seulement après que l'éclair a brillé.

Les diverses circonstances de ce bruit s'expliquent et par la longueur de l'éclair et par les échos qui servent à le répercuter. De cette grande longueur, en effet, il résulte que tous les points de l'éclair sont inégalement éloignés de l'observateur, et tous les bruits produits simultanément aux divers points n'arrivent que successivement à l'oreille. Ainsi, l'observateur est-il à 340 mètres de l'extrémité la plus voisine de l'éclair ? il commencera à entendre le bruit une seconde après que la lumière aura paru, et s'il se trouve à trois fois 340 mètres de l'autre extrémité, le bruit venant de ce second point ne lui parviendra qu'après trois secondes, les bruits issus des points compris entre les deux extrêmes arriveront successivement, ce qui fera durer le tonnerre pendant deux secondes.

739. Ces explications rendent compte aussi du renforcement avec lequel le tonnerre éclate à certains instants. Par sa forme en zigzag, l'éclair doit présenter un certain nombre de points situés à une même distance de l'observateur; les détonations qui ont lieu, en ces différents points, arrivant simultanément à l'oreille, produisent un bruit intense.

Les échos expliquent aussi le roulement du tonnerre; ces échos ont pour cause la proximité des nuages, du sol, des édifices ou des monta-

gnes. Il suffit d'avoir entendu un coup de canon dans les montagnes pour se rendre compte de cette dernière influence; quelquefois même le bruit ressemble à s'y méprendre à celui du tonnerre. Aussi c'est dans les gorges profondes des régions montagneuses que le roulement du tonnerre se prolonge assez longtemps, quelquefois il se fait entendre sans interruption, pendant toute la durée de l'orage, surtout si les éclairs se succèdent à de courts intervalles. Le phénomène acquiert alors un caractère de grandeur, qu'il ne présente jamais, quand l'orage éclate au-dessus d'une ville ou d'une vaste plaine.

740. **Effets de la foudre.** — Les effets de la foudre sont en grand ceux de l'étincelle électrique. Il y a donc lieu de les distribuer en trois classes : effets physiques, chimiques et physiologiques.

741. **Effets physiques.** — La foudre échauffe, fait rougir et fondre les fils métalliques fins qu'elle atteint et qu'elle parcourt. Voici un exemple entre mille (*) : Le paquebot de New-York reçut un coup de foudre dans la journée du 19 avril 1827. Une chaine de fer, de 40 mètres de long et en communication avec la mer par une de ses extrémités, fut fondue presque entièrement : le diamètre des barreaux qui formaient les chainons était de 6 millimètres.

Mais les effets ne sont pas toujours aussi puissants; les coups de foudre comme les étincelles de nos machines agissent avec une énergie en rapport avec la charge des nuages. Ainsi un coup de foudre, qui tomba sur la tour de Newbury, se propagea le long de la tige en fer du pendule de l'horloge sans la fondre; cette tige cependant n'avait que la grosseur d'une forte plume d'oie.

742. Des phénomènes de fusion sont aussi opérés par la foudre, qui traverse les matières terreuses. Des tubes creux, à parois vitreuses, se forment dans le sable, au point où la foudre a frappé : on les nomme des *fulgurites*. Pendant longtemps ces tubes ont été connus et leur mode de formation avait été expliqué, avant que des preuves certaines eussent établi la vérité de l'explication; mais le professeur Hagen de Kœnigsberg saisit la nature sur le fait. Le 17 juillet 1823, le tonnerre tomba sur un bouleau près du village de Rauschen; les habitants étant accourus virent, auprès de l'arbre, deux trous étroits et profonds. Le professeur Hagen fit creuser avec soin tout autour de ces trous, et il trouva un tube vitrifié très-brillant à l'intérieur et identique à ces tubes qu'on avait souvent rencontrés dans le sable et dont, sans démonstration suffisante, on attribuait la formation à la foudre. Avec une forte étincelle de la batterie, on a produit en petit des tubes semblables aux fulgurites.

(*) C'est dans la savante notice d'Arago, sur le tonnerre, que nous avons puisé nos exemples.

743. La foudre déplace les corps bons conducteurs, transporte non plus seulement des corps légers, mais des masses d'un poids considérable.

Le 6 août 1809, à Swinton, près de Manchester, la foudre arracha de ses fondations et souleva en masse un mur, qui se composait de 7 000 briques et pouvait peser environ 26 tonnes : l'explosion le transporta verticalement sans le renverser, l'une de ses extrémités avait marché de 9 pieds et l'autre de 4.

744. L'éclair agit sur les aiguilles aimantées, les désaimante en partie, quelquefois totalement, et même son action est assez puissante pour renverser les pôles. C'est en 1675 que le fait a été observé pour la première fois. A cette époque, deux bâtiments anglais marchaient de conserve dans un voyage de Londres à la Barbade. La foudre frappa l'un d'eux et le capitaine du navire préservé voyant que le bâtiment, atteint par l'éclair, virait de bord comme pour retourner en Angleterre, demanda la cause de cette détermination subite et n'apprit pas sans étonnement, que son compagnon croyait suivre encore sa première route. Un examen attentif montra, que les pôles des aiguilles étaient renversés : le pôle qui devait se diriger vers le Nord pointait au contraire vers le Sud.

Ainsi déjà, à l'intensité près, les effets physiques de la foudre sont ceux que nous a donnés l'électricité ordinaire.

745. **Effets chimiques.** — La foudre enflamme les matières combustibles comme l'étincelle enflamme dans nos laboratoires l'alcool, l'éther, les résines. En 1417, la foudre mit le feu à une pyramide en charpente, qui terminait le campanile de Saint-Marc à Venise. L'incendie consuma tout. La pyramide fut reconstruite, mais le tonnerre la réduisit de nouveau en cendres le 12 août 1489.

746. Dans l'eudiomètre l'étincelle électrique, en traversant un mélange d'oxygène et d'azote, produit de l'acide azotique. Aussi la foudre agit-elle sur les éléments de l'air, et trouve-t-on toujours dans les pluies d'orage, l'acide azotique combiné avec l'ammoniaque qui préexistait dans l'atmosphère.

747. Enfin, l'odeur spéciale qui se répand toujours dans l'air, au moment où la foudre tombe, ne peut s'expliquer que par un effet chimique de l'étincelle électrique. Mais en quoi consiste au juste cette action chimique? quels sont les corps qui réagissent dans ce cas? La solution de ces questions est encore douteuse. L'odeur est-elle due à la vapeur nitreuse, qui se produit toujours dans l'atmosphère au moment des orages et de la formation de laquelle nous venons de parler? Tient-elle au transport des matières combustibles enlevées aux corps que la foudre vient d'atteindre? ou bien enfin l'oxygène a-t-il acquis, sous l'influence de l'électricité, cet

état particulier que l'on a désigné sous le nom d'*ozone*? Chacune de ces opinions peut être soutenue, bien qu'il soit difficile d'accepter aucune d'elles comme définitive.

748. **Effets physiologiques.** —Quant aux effets physiologiques, ils sont bien connus : la foudre tue, blesse les animaux, quelquefois ne produit qu'une syncope momentanée et d'autres fois enfin elle ne donne qu'une forte commotion.

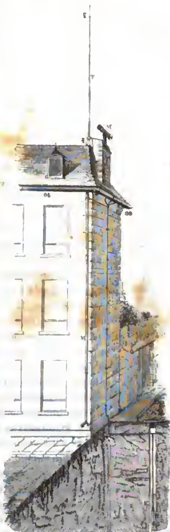
Le 11 juillet 1819 la foudre tomba pendant le service divin sur l'église de Châteauneuf-les-Moustiers, elle tua raides 42 personnes et en blessa 82. C'est un des exemples les plus effrayants des effets de la foudre; mais il ne faudrait pas trop s'en émouvoir, car en réalité le danger est très-minime. D'après Arago, la probabilité qu'il y a pour chacun des habitants de Paris de mourir foudroyé est moindre que celle d'être écrasé, en passant dans les rues, par la chute d'une cheminée ou d'un vase à fleurs.

S'il faut s'en rapporter à une croyance générale, on est beaucoup plus exposé en rase campagne que dans les villes. La précaution si souvent recommandée de ne point se réfugier sous de grands arbres pendant les orages, a surtout de l'importance, lorsqu'on se trouve au milieu d'une plaine unie et peu boisée. L'arbre qui sert d'abri contre la pluie représente, dans ce cas, à peu près le seul point culminant, qui puisse se trouver à une petite distance du nuage orageux, et comme il est mouillé par l'eau pluviale, il constitue un bon conducteur tout naturellement destiné à l'écoulement du fluide électrique. La même raison devrait faire prohiber l'usage, assez généralement répandu, de sonner les cloches pendant les orages; non pas que le bruit puisse avoir quelque influence sur la direction que suivra l'étincelle électrique, mais le sommet du clocher est un point élevé, les cloches sont des masses métalliques subissant promptement l'influence du nuage orageux, et celui qui tient la corde établit une communication directe entre les cloches et le sol. Si la foudre tombe sur l'édifice, il est presque certain que le sonneur sera la première victime.

749. **Choc en retour.** —Des animaux sont foudroyés, sans que la foudre les atteigne; mais ils le sont au moment où elle tombe à distance et souvent même à une distance assez considérable. On explique ce fait par l'action du nuage orageux, qui, s'exerçant sur les hommes ou sur les animaux placés à la surface du sol, accumule, à mesure qu'il approche, une grande quantité d'électricité dans leurs organes. Cette accumulation, lente si le nuage arrive lentement, ne produit pas des changements brusques, et s'opère sans effet fâcheux. Mais que le nuage se décharge subitement, même à une assez grande distance, l'électricité développée par influence n'est plus retenue; les organes traversés alors rapidement par le fluide élec-

trique, sont foudroyés comme ils l'auraient été par un coup de foudre direct. Tel est le phénomène que l'on nomme *choc en retour.*

750. **Paratonnerre.** — Franklin proposa de garantir les édifices de la foudre, en les armant de la barre métallique terminée en pointe IP (*fig.* 310), qui avait servi à constater l'identité de la foudre et de l'électricité. Cette barre s'appelle la *tige* du paratonnerre. La pointe, dirigée vers le ciel est mise en communication avec le sol par un *conducteur* de métal IA, qui complète le paratonnerre tout entier.


Fig. 310.

751. **Théorie du paratonnerre.** — L'effet du paratonnerre est aisé à comprendre. Un nuage orageux chargé d'électricité positive est-il au-dessus de l'édifice? Il agit par influence sur les corps conducteurs en présence : la pointe P (*fig.* 310) se charge d'électricité négative qui s'échappe et neutralise en partie celle du nuage; quant au fluide positif repoussé, il se rend dans le sol, par l'intermédiaire de la communication IA, dont nous venons de parler. Si tous les corps bons conducteurs de l'édifice, et surtout si les masses métalliques M sont unis avec la tige, toute électricité, que le nuage pourrait développer par influence, s'en ira continuellement vers la pointe. Dans ces conditions, trois résultats seront obtenus. 1° Le paratonnerre enlèvera sans cesse l'électricité aux diverses parties de l'édifice; 2° son extrémité la plus élevée sera toujours plus chargée que tout conducteur en présence du nuage orageux; 3° un flux constant d'électricité s'écoulera pour neutraliser le fluide dont les effets sont redoutés.

752. La foudre ne frappe un point quelconque que dans le cas où le fluide libre provenant de l'influence s'y trouve accumulé. L'édifice se

trouve donc protégé, puisqu'il ne peut garder qu'une faible charge d'électricité. Et si le nuage est fortement électrisé et que l'éclair jaillisse (cela est arrivé plus d'une fois), c'est le paratonnerre qui est frappé comme plus voisin du nuage et plus chargé d'électricité que tout autre point ; les électricités en mouvement suivent, sans causer aucun dommage, la chaine qui relie le paratonnerre au sol. Enfin le paratonnerre offre encore un avantage : il neutralise en partie la puissance électrique du nuage, il protégé ainsi par anticipation les objets au-dessous desquels ce nuage doit passer, dans sa course ultérieure.

753. **Tige du paratonnerre.** — La théorie qui précède enseigne les précautions que l'on doit apporter à l'établissement d'un paratonnerre. Il faut d'abord que l'extrémité de la tige soit aiguë ; c'est une difficulté : le fer qui constitue cette tige, se rouille par l'action de l'air et de l'eau, et la pointe d'une tige de fer serait bientôt émoussée. Une commission de l'Académie, dont Gay-Lussac fut nommé rapporteur, étudia la question et conseilla de former l'extrémité de la pointe avec le platine, c'est-à-dire avec le plus inaltérable des métaux. On réunit aujourd'hui le platine au fer en soudant à chaud les deux métaux de la même manière qu'on soude le fer au fer, sans l'emploi d'aucun corps intermédiaire. Mais le platine est cher, la soudure est difficile à exécuter et, dans ces derniers temps, l'Académie a cru pouvoir conseiller de remplacer la pointe de platine par un cône de cuivre doré CC' (*fig.* 311) que l'on visse aisément à l'extrémité de la barre. Le cuivre est moins bon conducteur que le platine, par suite, il s'échauffe davantage au passage de l'électricité, dont les mouvements, pendant les temps d'orage, fondraient la pointe si elle était très-fine; c'est pour cela qu'il a fallu lui donner la forme d'un cône : le cône présente une pointe, il est vrai, mais une pointe moins aiguë que celles qui étaient employées précédemment. La figure 311 donne *en demi-grandeur* les dimensions de cette partie du paratonnerre.



Fig. 311.

754. **Conducteur du paratonnerre.** — La communication avec le sol doit être extrêmement bien établie ; il faut qu'elle ait lieu dans un terrain humide, profond, et même avec une nappe d'eau de grande étendue. Pour assurer l'écoulement du fluide et empêcher en outre l'oxydation du fer, on entoure les branches du conducteur, qui pénètrent dans le sol, de braise de boulanger, qui conduit suffisamment l'électricité. Autrefois on avait conseillé de ne ramifier le conducteur que dans la nappe d'eau; mais à propos de l'installation des paratonnerres du Louvre et des Tuileries, M. Pouillet, au nom d'une commission de l'Académie des Sciences, a signalé une disposition nouvelle, qui a son importance. Il recommande de partager le conducteur, à son arrivée dans le sol, en deux branches : l'une qui devra descendre jusqu'à la

couche aquifère la plus rapprochée de la surface, l'autre qui devra s'étendre horizontalement en se ramifiant presque immédiatement au-dessous du pavé. La terre est-elle sèche au début de l'orage? le sol superficiel est mauvais conducteur de l'électricité et la branche profonde du paratonnerre fonctionne seule, en permettant le départ du fluide repoussé. La terre est-elle mouillée par la pluie? elle est conductrice, et alors la branche superficielle du conducteur sert à la préservation de l'édifice.

755. **Cercle de protection.** — On a cherché, en profitant des phénomènes que l'expérience a pu offrir, à évaluer l'espace qu'un paratonnerre protége, et la commission de l'Académie a émis l'opinion que cet espace est égal à un cercle dont le centre serait le pied de la tige du paratonnerre, et le rayon le double de la longueur de cette tige. Évidemment, il n'y a rien là de bien certain; aussi, la commission a-t-elle eu soin d'indiquer un espace plus petit que celui qu'elle regardait comme protégé réellement.

MAGNÉTISME

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

756. **Pierre d'aimant. — Aimants artificiels.** — On trouve abondamment, en certains lieux du globe, un minerai de fer qui renferme 72,4 pour 100 de fer, et 27,6 d'oxygène. Il est désigné, en chimie, sous le nom d'*oxyde salin de fer*, parce qu'on peut le considérer, comme résultant de la combinaison de 1 équivalent de sesquioxyde Fe^2O^3, jouant le rôle d'acide, avec 1 équivalent de protoxyde FeO jouant le rôle de base; sa formule brute est en effet représentée par Fe^3O^4. La plupart des échantillons de ce minerai présentent une propriété physique très-curieuse, comme celui A de la figure 312 : ils attirent le fer doux et l'acier. De plus ils communiquent leur vertu attractive à ce dernier corps, soit lorsqu'on les met en contact avec lui pendant un temps assez long, soit lorsqu'on les emploie pour exécuter des frictions à la surface d'un barreau d'acier trempé AMB de forme quelconque (*fig.* 313, 314 et 315). Le minerai, qui nous occupe, portait chez les Grecs le nom de (μάγνης), d'où nous avons fait le mot *magnétisme*, qui sert à désigner l'ensemble des phénomènes dérivant d'une cause commune et se rattachant à ce fait fondamental : l'attraction de

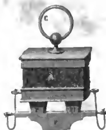


Fig. 312.



Fig. 313.

l'oxyde salin de fer pour le fer doux. En France, depuis longtemps, la même substance est appelée *pierre d'aimant*, *aimant naturel*, tandis qu'on nomme *aimants artificiels* les barreaux ou les aiguilles d'acier trempé auxquels la propriété magnétique a été communiquée.



Fig. 314.

757. Il ne faut pas croire cependant, que la faculté d'attirer le fer et l'acier soit inhérente à la substance même, qui forme la pierre d'aimant, au même titre, par exemple, que la couleur, que le mode de cristallisation, etc. On trouve, dans la nature, des portions du même minerai de fer qui sont tout à fait inertes au point de vue magnétique ; et d'autre part, on peut, en faisant passer un courant de vapeur d'eau sur le fer chauffé au rouge, préparer artificiellement cette même substance, et au moment où elle est obtenue par la réaction chimique, elle ne ne possède nullement la propriété en question. Enfin, il suffit de chauffer fortement l'aimant naturel ou artificiel, pour faire disparaître complétement l'aimantation. Il sera donc nécessaire, dans tout ce qui va suivre, de distinguer le corps aimanté du corps magnétique, quoiqu'au fond ce puisse être la même substance chimique. Le premier attire actuellement le fer doux ; le second ne l'attire pas, mais il peut acquérir cette propriété, quand on le soumet à des influences convenables.



Fig. 315.

758. **Variations de grandeur de la force attractive dans les différentes sections d'un barreau aimanté.** — L'action attractive exercée par le fer doux ne se manifeste pas avec la même énergie en tous les points d'un même fragment d'aimant naturel ou dans diverses sections d'un même barreau d'acier aimanté. Plusieurs expériences établissent nettement la vérité de cette assertion. 1° Quand un aimant quelconque est retiré de la limaille de fer dans laquelle on vient de le plonger, on voit (*fig.* 316) que les parcelles de ce métal s'accumulent de préférence en certains points, tandis que d'autres points en sont complétement dépourvus. Se sert-on d'une aiguille ou d'un barreau de forme parallélipipédique, la limaille adhère surtout vers les extrémités et notamment aux sommets anguleux, tandis que vers le milieu il y a une portion assez étendue de l'aimant, qui n'en retient aucune trace. 2° Si l'on met successivement les différentes tranches d'un barreau aimanté AB (*fig.* 317) en regard et à une



Fig. 316.

petite distance d'un petit cylindre de fer doux F suspendu à un fil de soie (appareil qu'on nomme *pendule magnétique*), on reconnaît que l'attraction est nulle au milieu du barreau et qu'elle se manifeste, au contraire, à une distance d'autant plus grande du petit pendule qu'on fait agir sur celui-ci une section plus voisine de l'extrémité du barreau. 3° Au-dessous d'une lame mince de carton (*fig.* 318) est d'abord placé un barreau aimanté; puis, à l'aide d'un petit tamis, on saupoudre uniformément le carton de limaille de fer; on voit aussitôt la limaille se porter, en plus forte proportion, vers les extrémités du barreau et en dessiner nettement la forme; de plus, les parcelles de fer se disposent bout à bout l'une à la suite de l'autre, de manière à figurer des courbes fermées se dirigeant vers deux centres d'action, symétriquement placés de part et d'autre du milieu du barreau.

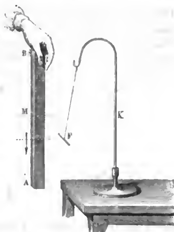


Fig. 317.

Cette troisième expérience nous éclaire sur deux points importants : en premier lieu, elle nous apprend, comme les précédentes, que l'action attractive dans un barreau aimanté, va en croissant, depuis le milieu du barreau, où elle est nulle, jusqu'aux extrémités où elle est maximum. En second lieu, elle établit que la vertu magnétique n'est nullement empêchée, dans ses effets, par l'interposition d'un corps étranger, le carton, qu'elle s'exerce à travers cette substance, comme elle le fait à travers l'air. Au reste ce dernier résultat n'est pas particulier au carton; il s'applique au bois, au verre, au cuivre, etc., etc., et en général à toutes les substances non magnétiques.

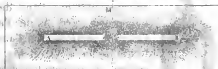


Fig. 318.

759. **Pôles et ligne neutre.** — En résumé, dans tout aimant naturel ou artificiel, quelle qu'en soit la forme, l'attraction magnétique se concentre en deux régions A et B qui sont séparées, l'une de l'autre, par un espace quelquefois considérable, où l'action exercée sur le fer doux est sensiblement nulle. Dans le cas d'un barreau ordinaire, les centres de l'action

magnétique sont situés vers les extrémités : on les nomme *pôles de l'aimant ;* le milieu de l'intervalle qui sépare les pôles s'appelle la *ligne neutre.* Telle est la première notion générale que nous pouvons donner en ce moment des pôles. Nous verrons plus tard qu'on peut, dans chaque moitié d'un barreau aimanté, considérer, sous certaines conditions, toutes les actions magnétiques de cette moitié comme concentrées en un point déterminé, qui est à proprement parler le pôle.

760. **Position des pôles. — Points conséquents.** — Les pôles ainsi définis sont, en général, au nombre de deux, symétriquement placés par rapport à la section moyenne du barreau et voisins des extrémités. Coulomb a trouvé par l'expérience que, lorsque le barreau est très-court, les pôles sont situés au sixième de la longueur totale à partir de chaque extrémité. Quelquefois, l'aimantation est très-irrégulière et il apparaît des pôles intermédiaires qu'on nomme *points conséquents.* Nous verrons bientôt dans quelles circonstances ces nouveaux centres d'actions magnétiques prennent naissance.

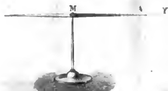


Fig. 319.

761. **Différence d'action des deux pôles.** — Une aiguille aimantée (*fig.* 319) est posée sur un pivot vertical terminé en pointe, de manière à pouvoir tourner dans un plan horizontal. Si l'on approche, successivement du même côté de cette aiguille, chacune des extrémités d'un aimant quelconque naturel ou artificiel, on reconnaît que l'une des extrémités de l'aimant attire toujours le côté A de l'aiguille considérée, tandis que l'autre la repousse; que l'aimant soit rectiligne, qu'il soit en forme de fer à cheval (*fig.* 320), qu'il ait la forme d'une sphère, on trouvera toujours deux régions telles que si l'une d'elles produit une attraction sur le pôle A, l'autre produit une répulsion sur le même pôle. Donc les deux pôles d'un même barreau n'exercent pas des actions identiques, ils présentent même dans certains cas un antagonisme évident.


Fig. 320.

762. **Direction et orientation de l'aiguille aimantée. — Action mutuelle des deux pôles.** — Pour bien comprendre l'hypothèse que nous développerons bientôt, hypothèse très-utile quand on veut grouper dans une même théorie tous les faits du magnétisme, nous exposerons une série d'expériences et de faits qui sont fondamentaux dans l'étude des propriétés de l'aimant.

763. I. Le premier fait était déjà connu à l'époque où Christophe Colomb entreprenait son premier voyage de découverte. Le voici : une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical et de plus assujettie à

demeurer horizontale (*fig.* 319), se *dirige*, *s'oriente*, quand on l'abandonne à elle-même. La direction est à peu près celle du nord au sud, et en outre le même côté de l'aiguille est constamment tourné vers le nord. Aussi pourrons-nous désormais, en raison de ce fait qui est général, employer les expressions pôle nord, pôle sud d'une aiguille ou d'un barreau aimanté, nous saurons au juste, le sens qu'il faut y attacher. Cette propriété remarquable de l'aiguille aimantée a été le point de départ de l'emploi de la boussole, qui rend de si grands services aux navigateurs et qui était connue, dit-on, par les Chinois dès l'an 121 de l'ère chrétienne.

764. II. Laissez deux aiguilles posées sur des pivots distincts et d'abord éloignées l'une de l'autre se diriger sous l'action de la terre; et après que les pôles se seront déterminés par la direction que prend l'aiguille, présentez le pôle nord de l'une au pôle nord de l'autre, vous verrez qu'il le repousse. De même les pôles sud des deux aiguilles étant rapprochés l'un de l'autre, il y aura répulsion. *Donc, en général, les pôles de même nom se repoussent.* — D'autre part, présentez le pôle nord de la première aiguille au pôle sud de la seconde, vous constaterez une attraction. Donc en général *les pôles de noms contraires s'attirent.*

765. III. La cause de la direction et de l'orientation de l'aiguille aimantée peut s'interpréter à l'aide de l'expérience suivante : placez (*fig.* 321) un support de cuivre P, terminé en pointe, au milieu d'un barreau aimanté AB horizontal, long et puissant; sur ce pivot, posez une aiguille aimantée ordinaire *ab*, vous verrez cette aiguille demeurer invariablement parallèle au barreau, quel que soit d'ailleurs l'azimut dans lequel vous le placiez.

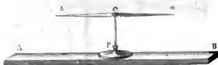


Fig. 321.

Cette expérience nous conduit à admettre, que tout se passe dans le cas de l'aiguille aimantée abandonnée à elle-même, comme si, au-dessous d'elle, se trouvait placé dans la terre, un aimant puissant qui serait à peu près dirigé invariablement du nord au sud, l'un des pôles de l'*aimant terrestre* attirant l'extrémité de l'aiguille qui se dirige vers le nord, l'autre pôle attirant celle qui se dirige vers le sud.

765 *bis*. **Noms donnés aux pôles.** — Cette manière de concevoir la cause de la direction, que prend l'aiguille aimantée, a conduit à une dénomination des pôles presque exclusivement adoptée en France. On a nommé, comme cela était naturel, *pôle boréal* de l'aimant terrestre, celui qui est placé au nord de la terre et *pôle austral*, celui qui est placé au sud. Ces noms donnés, on a été forcé d'appeler pôle *austral* d'une aiguille, celui qui est attiré par le pôle boréal de la terre et qui se dirige vers le nord; de même

il a fallu nommer pôle *boréal*, celui qui se dirige vers le sud. De là une contradiction apparente entre les termes et les idées : ce qu'il eût mieux valu éviter. Mais nous conservons ces dénominations, parce qu'elles sont trop en usage pour qu'on puisse se permettre de les changer.

766. **Étude détaillée de l'action de l'aimant sur le fer doux.** — La distinction des deux pôles, la connaissance de leurs actions mutuelles permettent d'étudier, d'une manière plus complète, en quoi consiste cette attraction, que nous n'avons fait qu'indiquer, entre le fer doux et l'aimant. Fixons une tige de fer F (*fig.* 322) en son milieu à un support fixe et approchons de chacune de ses extrémités *a* et *b* le pôle A' d'une aiguille aimantée; il y aura attraction ; nous le savons d'avance. Mais, pendant que ce pôle A' qui est un pôle austral, se trouve attiré par l'extrémité *a* de la tige de fer doux, plaçons vers l'extrémité de cette tige, à une petite distance de *b*, le pôle austral A d'un fort barreau aimanté. L'attraction, qui s'exerce sur le pôle A', sera aussitôt changée en répulsion, c'est-à-dire qu'il s'est produit à l'extrémité *a* de la tige de fer doux, par le fait seul de la présence de A, un pôle austral ou de même nom que celui qui agit dans le barreau.

Pour rendre l'expérience complète, laissons le barreau A et la tige de fer doux dans les mêmes positions relatives, et portons successivement, l'extrémité A' de l'aiguille aimantée à une petite distance des différentes sections de la tige F ; nous reconnaîtrons que le fer doux est devenu un aimant véritable, qu'il possède deux pôles et une ligne neutre. Un pôle *b* de nom contraire à A s'est formé dans le voisinage du pôle excitateur et un pôle de même nom dans les points les plus éloignés. Le résultat est le même, mais l'aimantation du fer doux est plus énergique lorsque le contact a lieu entre A et *b*.

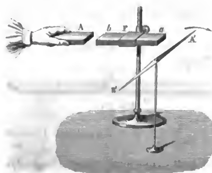


Fig. 322.

766 *bis*. **Différence entre l'acier et le fer doux. — Force coercitive.** — Toutefois, cette aimantation n'est que passagère pour le fer, elle cesse aussitôt que l'on éloigne l'aimant A. L'acier seul, quand il a subi l'influence prolongée d'un aimant, conserve le magnétisme, qui s'y est développé ; mais aussi, il faut beaucoup plus de temps pour que la seule proximité d'un aimant fasse apparaître dans l'acier les deux pôles et la ligne neutre. On énonce ces derniers résultats, en disant : que l'acier possède une *force coercitive* dont le fer est dé-

pourvu. Cette force empêcherait, dans les premiers moments, l'acier de s'aimanter, quand on le soumet à l'influence d'un pôle excitateur, et d'autre part, elle maintiendrait l'aimantation, qui a été produite par le contact prolongé de l'acier avec un aimant énergique.

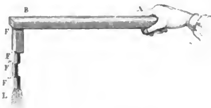


Fig. 323.

Pendant tout le temps que le fer doux est aimanté, il peut agir sur une autre tige de fer, à la façon d'un aimant ordinaire et développer en elle une aimantation temporaire. La seconde tige peut agir semblablement sur une troisième, et ainsi de suite. On explique alors aisément l'expérience figurée ci-contre (*fig.* 223) dans laquelle, par l'emploi d'un seul barreau aimanté, on peut supporter plusieurs morceaux de fer doux, qui demeurent suspendus l'un à l'autre, comme les anneaux d'une même chaine. Si l'on vient à enlever le barreau, tous les fragments se séparent l'un de l'autre, parce qu'ils cessent d'être aimantés.

767. **Hypothèse des deux fluides magnétiques. — Fluide neutre.** — Tous les faits qui précèdent peuvent être compris dans une théorie commune. On admet l'existence, dans les deux moitiés d'un aimant ordinaire, de deux fluides magnétiques distincts, l'action mutuelle de ces fluides étant tout à fait pareille à celle des fluides électriques : *Les fluides magnétiques de même nom se repoussent, les fluides de noms contraires s'attirent.* On a appelé *fluide boréal* le fluide qui réside dans le pôle boréal d'un aimant austral, *fluide austral* celui qui réside dans le pôle sud.

On admet de plus que les deux fluides magnétiques préexistent dans le fer, dans l'acier et, en général, dans toutes les substances dites magnétiques; ils constituent, par leur réunion, un fluide appelé *neutre*, qui est tel que la résultante des actions, qu'il exerce sur une masse de fluide libre, soit toujours égale à zéro.

Ces principes admis, les faits essentiels du magnétisme s'expliquent aisément. Ainsi, quand une tige de fer est soumise à l'influence du pôle austral d'un aimant (766), son fluide neutre est décomposé. Le fluide boréal contenu dans le fer doux se dirige du côté du pôle austral du barreau, qui l'attire, et le fluide austral repoussé se dirige en sens inverse et les pôles *a, b* prennent naissance. En vertu de l'attraction des fluides de noms contraires, le fer doux sera toujours attiré par l'aimant.

L'expérience décrite au § 766 *bis* s'explique tout aussi facilement (*fig.* 323); l'action de B décompose le fluide neutre de F, fait naître un pôle austral à la partie supérieure du prisme, un pôle boréal à sa partie inférieure. Ce dernier produit dans F' une polarité identique à celle que F pos-

sède déjà. Pour le même motif, F″, F‴ acquièrent des pôles semblablement distribués.

768. **Définition des pôles.** — Les hypothèses, que nous venons de faire sur la constitution des aimants, nous permettent de donner, dès à présent, une définition des pôles plus exacte que celle que nous avons adoptée jusqu'ici. Soit une particule de fluide magnétique libre *m* placée à une assez grande distance d'un barreau aimanté ; elle agit sur toutes les molécules de fluide libre placées dans les différentes sections de chaque moitié du barreau. De là, autant de forces qu'il y a de molécules magnétiques ; ces diverses forces sont inégales, car nous venons de démontrer que l'action attractive, exercée par la section d'un barreau sur la pendule électrique, dépend de la distance de cette section à l'extrémité du barreau ; mais elles pourront être considérées comme parallèles entre elles, si la molécule *m* est suffisamment éloignée de l'aimant. Or nous avons établi (36) que le point d'application de la résultante d'un système de forces parallèles est tout à fait indépendant de la direction absolue de ces forces, pourvu que leurs rapports de grandeur ne soient pas changés ; donc la résultante des actions magnétiques exercée par la molécule *m*, située à une grande distance, sur les différentes molécules magnétiques de l'une des moitiés du barreau, aura, dans cette moitié, un point d'application qui sera tout à fait indépendant, quant à la position, de la direction donnée au barreau. C'est ce point d'application placé dans l'aimant, à une petite distance de chaque extrémité, qui est véritablement le pôle.

768 *bis*. **Effet produit par la rupture d'un barreau aimanté.** — Les fluides magnétiques, séparés dans le fer ou dans l'acier par l'influence du pôle d'un barreau voisin, ne peuvent pas être considérés, comme se transportant l'un à gauche, l'autre à droite de la ligne neutre. Dans toute l'étendue du barreau aimanté, se trouvent l'un et l'autre des deux fluides, mais ils y sont distribués en proportion telle que tout se passe, comme si le côté nord ne renfermait que du fluide austral et le côté sud du fluide boréal. Une expérience très-nette nous fournit la preuve de cette assertion. On aimante une longue aiguille d'acier en la frottant plusieurs fois, dans le même sens, avec l'une des extrémités d'un barreau aimanté ; on détermine l'extrémité de cette aiguille qui correspond au pôle austral, puis, on la marque par une petite entaille. Cette détermination est toujours facile ; il suffit de faire agir successivement, par chacun de ses bouts, l'aiguille qu'on vient d'aimanter sur le pôle austral de l'aiguille ordinaire qui nous a déjà servi (*fig.* 319). Le côté qui exerce une répulsion correspond au pôle austral de notre nouvel aimant. Ceci connu, on brise l'aiguille en son milieu ; on cherche, par la méthode habituelle, quel est le genre d'aimantation que possède chaque moitié ; on trouve qu'elles représentent chacune un aimant véritable. Les pôles précédents se sont inté-

gralement conservés à la place qu'ils occupaient tout d'abord, et au point de rupture, il est apparu deux pôles nouveaux a_1, b de noms contraires, qui ont été pris individuellement par chaque partie de l'aiguille. Qu'au lieu de deux fragments seulement on en produise dix, vingt... un nombre quelconque, le résultat final sera toujours le même : chaque fragment représentera un aimant complet, et les pôles y seront toujours distribués de telle manière que si on met ces fragments bout à bout, et dans la position qu'ils occupaient pour former l'aiguille avant sa rupture (*fig.* 324), on retrouvera les pôles extrêmes à leur place primitive, et les pôles intermédiaires alterneront avec une régularité parfaite.

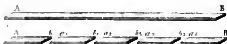


Fig. 324.

769. Il n'est donc pas possible d'admettre, comme dans le cas de l'électricité par influence, que les fluides se transportent aux deux extrémités du barreau : on est porté à penser, d'après l'expérience précédente, que les molécules de fluide neutre se dirigent et s'orientent, sous l'action d'un aimant extérieur, en tournant toutes leur fluide austral du même côté du barreau et leur fluide boréal du côté opposé. On a fait voir que la théorie des deux fluides ainsi comprise rendait compte de la formation des deux pôles, de la position qu'ils occupent, en un mot, de l'action différente des diverses parties d'un barreau aimanté, qu'elle expliquait d'une façon très-satisfaisante les faits principaux du magnétisme. Mais quelque ingénieuse que soit cette manière de concevoir la cause des phénomènes, et quelque simplicité que présentent les déductions, nous nous abstiendrons de tout développement, car ces raisonnements perdent beaucoup de leur importance quand on sait (ce que nous ferons voir dans la suite) que les phénomènes magnétiques se ramènent tous à ceux que présente, sous certaines conditions, un courant d'électricité.

MAGNÉTISME TERRESTRE.

770. **Nature de l'action exercée par la terre sur l'aiguille aimantée.** — Quand une aiguille aimantée est rendue libre, l'aimant terrestre ne saurait lui communiquer aucun mouvement de translation : son action est purement directrice. Ce fait important se démontre par les expériences suivantes :

I. Si on place une aiguille aimantée sur un disque de liége, qui flotte à la surface de l'eau, le disque tourne autour de la verticale, jusqu'à ce que l'aiguille ait pris sa direction habituelle du nord au sud ; à partir de ce moment, il demeure immobile et ne tend nullement à se

transporter vers aucun point de l'horizon. Donc, en premier lieu, les actions magnétiques du globe ne peuvent pas se réduire à une force unique dirigée horizontalement.

II. L'expérience, que nous venons de décrire, peut ne pas paraître assez concluante : la viscosité de l'eau ne présente-t-elle pas une résistance trop grande, qui empêche le mouvement d'entrainement de se prononcer? On donne à l'aiguille une plus grande mobilité : une planchette en bois très-mince et très-légère *ab* est suspendue par son milieu C (*fig.* 325) à un fil de soie sans torsion ; une aiguille aimantée AB est posée à plat, vers l'une des extrémités de la planchette, dans une direction à peu près perpendiculaire à sa longueur ; à l'autre bout de la petite lame de bois, est placé un contre-poids L destiné à la maintenir horizontale. On fait tourner le système, jusqu'à ce que l'axe de l'aiguille ait pris sa direction ordinaire, et l'on constate, qu'à partir de ce moment, l'équilibre de l'appareil demeure invariable. Or, on peut donner à ce petit instrument une mobilité telle qu'une force d'un milligramme appliquée suivant le prolongement de l'aiguille fasse tourner la planchette d'un angle appréciable. Puisque la rotation n'a pas lieu, nous devons en conclure que le globe n'exerce pas une action de transport, dans le sens horizontal, qui puisse être rendue sensible par les moyens ordinaires.

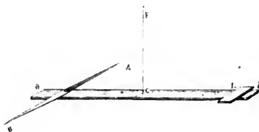


Fig. 325.

III. Un barreau d'acier que l'on suspend à l'un des plateaux d'une balance présente exactement le même poids, avant et après son aimantation ; donc la force magnétique de la terre ne peut produire, sur un aimant, aucun effet d'entrainement dans le sens vertical.

En somme, l'action terrestre ne peut pas se réduire à une force unique soit horizontale, soit verticale : elle ne saurait être non plus une force oblique; car, dans cette dernière hypothèse, elle donnerait naissance à une composante horizontale et à une composante verticale qui (nous venons de le montrer) n'existent ni l'une ni l'autre.

771. Couple terrestre. — Voici comment on peut s'expliquer très-simplement le phénomène de direction et d'orientation présenté par l'aiguille aimantée sous l'influence du globe. Soit une aiguille AB librement suspendue par son centre de gravité, à un fil de soie sans torsion; chacun de ses pôles est soumis à l'action des pôles A_1, B_1 que nous suppo-

serons appartenir à l'aimant terrestre, pôles situés à une grande distance de l'aiguille AB. Le pôle A_1 en particulier donne naissance à deux forces égales, parallèles et agissant en sens contraire : l'une répulsive, appliquée au point A, l'autre attractive, appliquée en B. De même, le pôle B produit deux forces nouvelles, égales entre elles, parallèles et de sens contraire : l'une attractive appliquée en A, l'autre répulsive, en B. Ces deux dernières forces pourront être égales aux deux précédentes, si l'aiguille AB est à la même distance des pôles A_1 et B_1; mais, en général, l'égalité en question n'existera pas. En tous cas, l'aiguille AB est, en définitive, soumise à quatre forces qui, en se composant deux à deux, se réduisent à deux résultantes égales, parallèles, de sens contraires, appliquées en A et en B. Un pareil système porte, nous l'avons vu (34), le nom de couple et son effet consistera, dans le cas actuel, à faire tourner l'aiguille autour de son point d'attache, jusqu'à ce qu'elle ait pris la direction des forces du couple. Quand cette rotation aura été produite, les deux forces toujours appliquées aux pôles de l'aiguille agiront suivant le prolongement l'une de l'autre ; par suite, elles se détruiront.

L'explication, que nous venons de donner, et l'existence du couple terrestre supposent que, dans les diverses positions que l'on donne actuellement à une aiguille aimantée en un même lieu de la terre, les forces magnétiques du globe, qui agissent sur elle, conservent toujours la même intensité, la même direction et le même point d'application. Cette hypothèse se trouve pleinement justifiée par les vérifications expérimentales de toutes ses conséquences. Nous indiquerons tout à l'heure une de ces vérifications.

772. **Détermination des éléments du magnétisme terrestre. Déclinaison. Inclinaison.** — Pour que la force magnétique du globe fût complétement déterminée, il faudrait connaître sa direction et son intensité. La direction (le seul élément que nous voulions fixer ici) sera déduite de la mesure de deux quantités que nous allons actuellement définir : 1° la *déclinaison* de l'aiguille aimantée; 2° son *inclinaison*.

L'aiguille aimantée n'est pas, en général, exactement dirigée du nord au sud, c'est-à-dire que le plan vertical, qui passe par l'axe d'une aiguille aimantée horizontale et qu'on a nommé *méridien magnétique*, ne se confond pas habituellement, en chaque lieu, avec le méridien terrestre. Ces deux plans forment un angle qui a reçu le nom d'*angle de déclinaison :* il est mesuré par l'angle des deux lignes que fournissent, par leur intersection avec l'horizon du lieu, le plan du méridien magnétique et celui du méridien terrestre. La connaissance de la déclinaison nous donnera la position exacte du plan vertical, qui contient les forces magnétiques.

D'autre part, la connaissance de l'inclinaison nous donnera la direction

véritable de ces forces dans le plan en question. On nomme en effet *inclinaison* l'angle que fait, avec l'horizon, une aiguille aimantée mobile dans le plan même du méridien magnétique, autour d'un axe vertical qui passe par son centre de gravité. C'est, en définitive, l'angle que fait avec l'horizon la force magnétique du globe appliquée au pôle de l'aiguille.

773. **Décomposition de la force magnétique du globe en trois composantes.** — Pour se rendre un compte plus facile des méthodes, qui ont été suivies dans le but d'évaluer la déclinaison et l'inclinaison de l'aiguille aimantée, nous remplacerons la force magnétique du globe BR appliquée à chaque pôle de l'aiguille par trois composantes, agissant suivant trois directions rectangulaires choisies arbitrairement. Nous prendrons, pour première direction la verticale BZ passant par le pôle considéré; pour seconde direction, l'horizontale BX menée par le pôle dans le plan vertical qui contient l'aiguille; pour troisième direction, l'horizontale BY perpendiculaire à BX. Cette décomposition faite, il nous sera facile de reconnaître quelles sont les composantes, qui interviennent pour imprimer à l'aiguille une direction déterminée. Soit FM le fil qui supporte l'aiguille; AB la direction de l'aiguille suspendue par son centre de gravité et située dans un azimut quelconque; soient MM', HH', les traces du méridien magnétique et du plan vertical qui contient l'aiguille, sur le plan horizontal passant par le point M; α représentera l'angle des deux lignes et, par suite, la distance angulaire qui sépare le plan actuel de l'aiguille du plan du méridien magnétique.

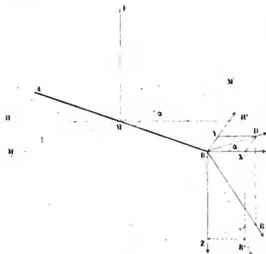


Fig. 326.

774. Décomposons d'abord la force BR en deux autres, suivant deux directions rectangulaires : la verticale BZ et l'horizontale BD contenues dans un plan parallèle à FMM'. En appelant i l'angle que fait la force BR avec la verticale, angle qui n'est autre chose que le complément de l'inclinaison,

nous aurons : $BZ = BR \cos i$; $BD = BR \sin i$. Décomposons maintenant BD en deux forces suivant BX et BY; l'angle DBX est égal à α comme ayant ses côtés BD, BX, parallèles à MM' et à MH'. On aura $BX = BD \cos \alpha$; $BY = BD \sin \alpha$. Remplaçant BD par sa valeur, il vient, en définitive, pour l'expression des trois composantes de BR : $BZ = BR \cos i$; $BX = BR \sin i \cos \alpha$; $BY = BR \sin i \sin \alpha$.

La dernière égalité nous montre qu'une aiguille aimantée astreinte à demeurer horizontale ne peut être en équilibre que si elle se trouve placée dans le plan du méridien magnétique. En effet, la composante BZ se trouve dans ce cas détruite par le mode de suspension; la composante BX, située sur le prolongement de l'aiguille, est détruite également; la seule force BY, qui reste pour faire tourner l'aiguille, devra donc être égale à zéro pour que le système soit en équilibre : alors α sera égal à 0°.

En outre, la même égalité nous fait voir que, lorsque l'aiguille est écartée de cette position normale, la force qui tend à l'y ramener varie proportionnellement au sinus de l'angle d'écart α. Cette conséquence a pu être vérifiée expérimentalement par Coulomb; nous exposerons sa méthode, parce que nous trouvons là une justification des hypothèses sur lesquelles notre raisonnement s'est fondé (771).

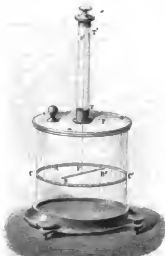


Fig. 327.

775. Coulomb se servait, pour effectuer cette vérification, d'une balance tout à fait semblable à celle dont il a été question pour la démonstration des lois des actions électriques (*fig.* 327); au fil métallique FF', était suspendue une chape en papier fort, sur la partie horizontale de laquelle était étendue une mince couche de cire molle. On commençait par placer dans la chape, une tige de cuivre de même dimension que le barreau aimanté, qu'on devait ultérieurement employer. Puis, on mettait cette tige, exactement dans le plan du méridien magnétique, en ayant soin de supprimer toute torsion du fil et de diriger la ligne qui allait du 0 au 180° degré du cercle CC', dans le prolongement de l'axe de cette tige.

Ces dispositions prises, le barreau aimanté BB' remplaçait la tige en pénétrant dans le sillon que celle-ci avait creusé dans la cire; il se trouvait placé de lui-même dans le plan du méridien magnétique, sans que le fil de suspension éprouvât aucune torsion. Il n'y avait plus alors qu'à estimer quelles

étaient les grandeurs des forces de torsion nécessaires pour maintenir le barreau écarté d'un angle de 1, de 2, de 3 degrés, etc., par rapport à sa position première. Comme la force de torsion est normale à l'aiguille, puisqu'elle est tangente au cercle, que parcourt son extrémité, elle est directement opposée à la composante BY, et par suite elle lui est égale au moment où l'équilibre existe. Mais la force de torsion s'estime par l'angle de torsion, dont la valeur est fournie par le micromètre supérieur de la balance. On a donc aussi finalement la mesure de la composante BY, pour chaque déviation nouvelle de l'aiguille.

Coulomb reconnut, par ce procédé, que : pour de très-petits angles, la valeur de cette force était proportionnelle à l'angle d'écart de l'aiguille ; mais que, pour des déviations un peu plus grandes, elle variait proportionnellement au sinus de cet angle. Ces deux résultats ne sont nullement contradictoires : on sait, en effet, que lorsque l'angle est très-petit, le sinus et l'arc se confondent sensiblement.

776. **Mesure de la déclinaison.** — Voici la marche à suivre pour mesurer la déclinaison. Une aiguille aimantée portant, vers son milieu, une chape en agate sera posée sur un pivot vertical, de manière à posséder une mobilité parfaite dans un plan horizontal ; ou mieux encore, on la suspendra à un faisceau de fils de soie très-fins : c'est cette dernière méthode qui est adoptée dans la boussole de Gambey, la seule que nous décrirons. Dans les deux cas, si l'aiguille était exactement suspendue par son centre de gravité, elle ne pourrait demeurer horizontale, parce que la force magnétique du globe tend toujours à lui faire prendre sa propre direction. Aussi est-on obligé de rendre, par tâtonnement, dans nos appareils, la moitié qui correspond au pôle boréal, un peu plus lourde que l'autre. Lorsque cette horizontalité est obtenue et que d'ailleurs l'aiguille est régulièrement aimantée, son axe de figure passe par les pôles magnétiques, et alors la position de cette aiguille sur un limbe gradué horizontal donne immédiatement la trace du méridien magnétique. Il n'y a plus alors qu'à obtenir sur le même limbe, la trace du méridien terrestre pour en déduire, par une simple lecture, l'angle de déclinaison cherché.

777. **Boussole de Gambey.** — Un long barreau aimanté AB est supporté par un faisceau de fils de soie F attaché au treuil T ; il est terminé, à chacune de ses extrémités, par un anneau métallique dans lequel sont tendus deux fils fins croisés à angle droit, qui, par leur intersection, donnent deux points de l'axe de figure du barreau. Tout le système fait partie d'une pièce à deux montants verticaux en cuivre C, C', mobile autour d'un axe vertical, qui passe par le centre d'un limbe gradué horizontal KK'. Cette pièce entraîne dans sa rotation les alidades N, N' munies de verniers qui permettent d'estimer, sur le limbe, la quantité dont le système tourne

autour de la verticale. Un axe OO', parallèle au plan du limbe, s'appuie sur la partie supérieure des deux montants, et c'est autour de lui que s'effectue la rotation d'une lunette MM' mobile dans un plan vertical, et portant deux fils croisés au foyer de son oculaire. Enfin, tout l'appareil est sur un pied en cuivre à trois branches aux extrémités desquelles des vis calantes, permettent de régler l'horizontalité du limbe et celle de l'axe de la lunette. Nous supposerons pour plus de simplicité, dans ce qui va suivre, que la verticale menée par le point d'attache du barreau, passe par le centre du limbe gradué, et soit toujours contenue dans le plan vertical qui comprend l'axe optique de la lunette.

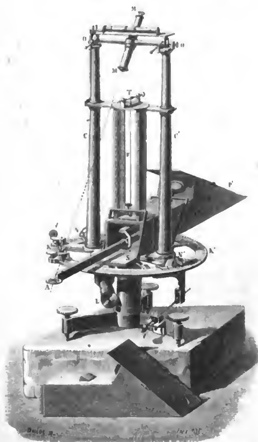


Fig. 328.

778. **Procédé d'observation**. — Voici maintenant en quoi consiste l'emploi de cet appareil, que nous supposons bien construit et bien réglé. Le limbe demeurant fixe, on fait tourner le système COO'C' jusqu'à ce que l'axe optique de la lunette aille rencontrer successivement les points de croisée des fils, qui appartiennent, comme nous savons, à l'axe du barreau. A ce moment, par conséquent, le plan vertical, qui contient cet axe optique, représente le plan du méridien magnétique : car nous admettons, pour un instant, que l'axe de figure du barreau se confond avec son axe magnétique. On note la position du vernier de l'alidade sur le limbe gradué. On dirige, en second lieu, la lunette MM' vers un astre connu, au moment précis où il se trouve dans le méri-

dien du lieu. Le plan, qui contient, cette fois, l'axe optique de la lunette, se confond avec le méridien terrestre. On note la nouvelle position du zéro de chaque alidade sur le cercle divisé. Le déplacement angulaire, que l'on vient d'évaluer ainsi, représente la déclinaison cherchée. Les boites P et P', qu'on voit sur la figure, sont destinées à protéger le barreau mobile contre les mouvements que les courants d'air tendraient à lui imprimer. Des fenêtres pratiquées dans les boites et garnies de lames de verre, permettent à l'observateur de viser en A et B, aux points de croisement des fils.

Nous nous sommes placé, à dessein, pour faciliter l'exposé de la méthode, dans les conditions les plus simples ; mais il ne faut pas croire qu'il soit nécessaire de viser l'astre, au moment où il passe au méridien du lieu. Il suffit de diriger vers lui la lunette, à une époque quelconque, pourvu qu'on inscrive, avec soin, l'heure précise de l'observation. On peut parfaitement en déduire, par un simple calcul trigonométrique, l'angle que fait, à ce moment, le vertical de l'astre avec le méridien du lieu et par suite la position réelle de ce dernier.

La lunette doit offrir une disposition particulière, pour qu'il soit possible d'apercevoir avec elle, tantôt un point assez rapproché : le point de croisement des fils dans les anneaux, tantôt un point très-éloigné : une étoile. Dans ce but, en avant de la lentille objective ordinaire qui est à long foyer, se trouve une lentille d'un moindre diamètre, qui, par sa réunion avec la précédente, forme un objectif à court foyer. Veut-on viser un objet rapproché? on recouvre, avec un écran annulaire, la portion de la grande lentille placée en dehors de la petite, de telle sorte que la lumière émanée de l'objet soit obligée de traverser exclusivement le système des deux objectifs. Veut-on distinguer un objet éloigné? on recouvre avec un écran qui a la forme d'un disque, la partie antérieure de la petite lentille, et alors la lumière ne peut plus passer que dans la portion annulaire de l'objectif à long foyer. Dans quelques appareils, et en particulier dans celui qui est ici figuré, on arrive au même résultat, en n'employant la lunette que pour viser l'astre : on substitue à la lunette ordinaire une sorte de microscope quand il s'agit de pointer vers les extrémités du barreau.

779. **Méthode du retournement.** — Enfin, nous avons supposé, que l'axe de figure du barreau se confondait avec la ligne des pôles ou axe magnétique. Cette condition est presque impossible à réaliser ; on est obligé, dans la plupart des cas, de recourir à la méthode du *retournement*. Une première opération est exécutée comme il vient d'être dit ; puis, on en fait une seconde en retournant le barreau, c'est-à-dire en rendant supérieure la face qui était inférieure. La moyenne des deux observations ainsi pratiquées donne la vraie position de l'axe magnétique. Ce retournement

est facilité, dans la boussole de Gambey, par l'emploi d'un étrier, qui entoure le barreau en son milieu, et auquel le faisceau de fils de soie est attaché. Le barreau est mobile dans l'étrier et on peut, aisément, lui faire occuper les deux positions voulues.

Pour comprendre comment la moyenne des deux mesures, faites sur le limbe comme il vient d'être dit, donne le résultat demandé, il suffit de remarquer que, si l'on retourne l'aiguille AB, la ligne des pôles demeure invariablement parallèle à elle-même. Par suite, on peut considérer la lame aimantée retournée, comme ayant exécuté sa rotation, autour d'une ligne passant par son centre de suspension et parallèle à la ligne des pôles. Alors l'axe de figure se trouve, après le retournement, dévié de l'autre côté de cette ligne fixe d'une quantité angulaire précisément égale à celle qui l'en séparait primitivement du côté opposé. Ceci est vrai dans tous les cas, alors même que la ligne des pôles ne passe pas par le centre de suspension, alors même que l'axe de figure ne passe pas par ce même point.

780. **Mesure de l'inclinaison.** — Dans la boussole d'inclinaison, l'aiguille aimantée est mobile sur un cercle gradué vertical VV', autour d'un axe horizontal. Le cercle peut lui-même tourner autour d'un axe vertical qui passe par le centre d'un limbe gradué horizontal OO'; et dans sa rotation, il entraîne une alidade T qui se meut sur ce dernier limbe. Si l'on connaissait la position exacte du plan du méridien magnétique, il suffirait d'amener, en coïncidence avec ce plan, le cercle vertical mobile de la boussole, et alors la position de l'aiguille par rapport à la ligne HH' allant du 0 au 180° degré, (ligne qui est rendue toujours horizontale à l'avance) s'obtiendrait par une simple lecture et l'on aurait l'angle d'inclinaison cherché. Il y a donc, tout d'abord, à déterminer la position du méridien magnétique. Recourons, dans ce but, aux valeurs que nous avons données plus haut des composantes de la force magnétique du globe. Par le mode de suspension adopté dans la boussole d'inclinaison, la composante BY est détruite, et il ne reste pour agir sur l'aiguille que les composantes BX et BZ. Ces deux forces donnent une résultante BR' qu'on obtiendra par la méthode ordinaire (31) et dont l'expression est :

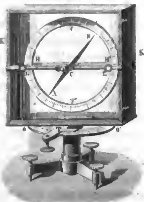


Fig. 329.

$$BR' = \sqrt{BX^2 + BZ^2} = \sqrt{BR^2 (\sin^2 i \cos^2 \alpha + \cos^2 i)};$$

nous pouvons la mettre sous la forme :

$$BR' = BR \cos i \sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\, i \cos^2 \alpha}.$$

et cette valeur pourra trouver son utilité dans certains cas. Pour le moment, ce qui intéresse, c'est l'angle i' que cette résultante fait avec la verticale ; il s'obtient par l'égalité $\mathrm{tg}\, i' = \frac{BX}{BZ} = \mathrm{tg}\, i \cos \alpha$. Ici l'angle α est celui que fait le plan du limbe VV' avec le plan du méridien magnétique, angle que nous pouvons changer à volonté : il nous suffit pour cela de faire tourner le limbe. Si l'on fait varier α depuis 0° jusqu'à 90°, $\mathrm{tg}\, i'$ ira toujours en décroissant ; et pour $\alpha = 90°$, $\mathrm{tg}\, i' = \mathrm{tg}\, i \cos 90° = 0$. Dans cette condition, l'angle i' de l'aiguille avec la verticale sera donc nul : cela signifie que l'aiguille se tient verticale lorsque le plan vertical de la boussole se trouve placé dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique.

781. Ce dernier résultat nous fournit un moyen très-simple de résoudre la question qui nous occupe. Il faudra faire tourner le limbe mobile VV' jusqu'à ce que l'aiguille soit exactement verticale et noter alors la position du zéro de l'alidade sur le cercle horizontal ; puis, faire tourner le même limbe de 90°, afin qu'il se trouve exactement placé dans le plan du couple terrestre. Il n'y aura plus qu'à lire l'angle que fait l'aiguille avec la ligne HH' qui va du 0 au 180° degré pour avoir l'inclinaison demandée.

Ce procédé est défectueux en ceci : quand l'aiguille est à très-peu près verticale, on peut faire tourner le limbe mobile d'une quantité notable, sans que l'aiguille paraisse se déplacer. Il y a donc incertitude sur la vraie position du zéro de l'alidade. La méthode suivante est préférable : nous avons obtenu déjà la relation $\mathrm{tg}\, i' = \mathrm{tg}\, i \cos \alpha$. La valeur de i', qui s'y trouve, correspond à l'angle que fait l'aiguille avec la verticale, quand elle se meut dans un plan distant de α du méridien magnétique ; or, si on fait une seconde observation en portant ce plan à 90 degrés de sa position première, l'angle i'', que fera l'aiguille avec la verticale, sera donné par l'équation, $\mathrm{tg}\, i'' = \mathrm{tg}\, i \sin \alpha$. Élevant ces deux équations au carré, et ajoutant membre à membre, on a $\mathrm{tg}^2\, i' + \mathrm{tg}^2\, i'' = \mathrm{tg}^2\, i$. Donc i peut se calculer facilement par l'évaluation préalable de i' et de i'' dans les conditions qui viennent d'être précisées.

782. **Corrections.** — La mesure de l'inclinaison exige aussi certaines corrections indispensables ; il faut d'abord, comme dans le cas précédent, effectuer chaque fois, deux mesures de i' : l'une avant, l'autre après le retournement (779), pour avoir la vraie position de l'axe magnétique de l'aiguille ; il faut ensuite tenir compte de cette circonstance que l'axe de suspension peut ne pas passer exactement par le centre de gravité de l'aiguille : l'une des moitiés de cette aiguille étant plus pesante que l'autre,

l'inclinaison se trouve augmentée ou diminuée d'une quantité inconnue. Pour remédier à ce vice de construction, on fait d'abord deux observations, comme il vient d'être dit, l'aiguille se trouvant dans son état d'aimantation ordinaire ; puis, on l'aimante, en sens contraire, de manière que le pôle austral devienne un pôle boréal, et réciproquement. On prend deux nouvelles mesures de i' en suspendant au centre du limbe VV' l'aiguille dont la polarité a été renversée. Si la moitié correspondant au pôle austral était la plus lourde, et si pour ce motif l'inclinaison se trouvait augmentée de ε, actuellement ce sera le pôle boréal qui descendra un peu plus bas, puisqu'il se trouve dans la moitié la plus pesante, et dès lors l'inclinaison sera diminuée de la même quantité ε. La moyenne des quatre mesures fournit avec une approximation suffisante la valeur de l'angle auxiliaire i'; l'angle i'' est évalué en suivant la même marche, et par suite la valeur de i s'obtient en appliquant la formule $\text{tg}^2\, i = \text{tg}^2\, i' + \text{tg}^2\, i''$.

783. **Variation de la déclinaison dans un même lieu.** — L'angle de déclinaison change d'un point à l'autre, à la surface de la terre ; estimé en un même lieu du globe, il varie d'une manière continue. Occupons-nous d'abord de la variation la plus facile à observer, celle qui se produit dans une même localité.

L'aiguille aimantée semble osciller de part et d'autre du méridien terrestre, en employant un grand nombre d'années, pour rendre son oscillation complète : ces variations de l'aiguille sont dites *variations séculaires*. A Paris, en 1580, le pôle austral de l'aiguille était à l'est de la méridienne (dans ce cas la déclinaison est dite orientale), et l'écart angulaire était de 11° 30'. Peu à peu, cet écart a diminué jusqu'en 1663, où il est devenu nul ; Paris se trouvait sur une de ces lignes que l'on a tracées sur la carte du monde et qu'on nomme lignes sans déclinaison. Puis, ce pôle austral a passé à l'ouest de la méridienne, la déclinaison est devenue occidentale ; en 1700, elle était déjà de 8° ; en 1785, de 22° ; en 1814, de 22° 34'. Ce dernier angle a représenté l'écart maximum de l'aiguille à l'ouest du méridien. Depuis cette époque, la déclinaison a sans cesse diminué, et en 1849 elle n'était plus que de 21° ; en 1854, de 19° 58'. La même variation séculaire a été constatée pour l'aiguille aimantée dans un grand nombre de pays : à Londres, la déclinaison arriva à son maximum du côté de l'ouest en 1815 ; elle fut alors de 24° 2' ; en 1849, elle était de 18°.

Indépendamment des variations séculaires, l'aiguille est encore soumise à des *variations diurnes*. Pendant la nuit, l'aiguille demeure à peu près immobile dans nos climats ; mais elle se met en mouvement dès le lever du soleil, marchant d'abord de l'est vers l'ouest ; puis, vers une heure de l'après-midi, elle rétrograde vers l'est et finit par reprendre sa position première vers 10 heures du soir.

Enfin, la déclinaison subit des *variations accidentelles*, notamment aux

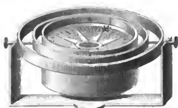
époques où se montrent les aurores boréales. L'été très-chaud de 1859 fut suivi de l'apparition de plusieurs aurores boréales d'un très-grand éclat, et l'on vit aussitôt se produire des changements brusques dans la direction de l'aiguille aimantée.

784. **Variation de l'inclinaison en un même lieu**. — On prend toujours, pour mesure de l'inclinaison, la valeur du plus petit des deux angles supplémentaires que fait l'axe de l'aiguille avec l'horizon. La grandeur de cet élément du magnétisme terrestre change, d'ailleurs, comme la déclinaison, d'un lieu à l'autre, elle est aussi variable avec le temps. Depuis 1671, époque à laquelle sa valeur à Paris était de 75°, l'inclinaison est toujours allée en décroissant: elle était de 67° 14′ en 1835; de 67° en 1849; de 66° 25′ en 1856. Des changements dans le même sens ont été observés à Londres et à Genève.

En général, quand on s'avance de l'équateur vers le pôle nord de la terre, l'inclinaison va en augmentant. C'est le pôle austral de l'aiguille aimantée qui s'abaisse de plus en plus au-dessous de l'horizon. Le capitaine Parry a signalé un point qui correspond à peu près à la latitude nord de 75°, pour lequel l'inclinaison est de 90°. En ce point, les forces du couple terrestre sont évidemment verticales. Aussi, lorsqu'on y porte l'aiguille de déclinaison, celle-ci n'accuse-t-elle pas une direction fixe; elle se tient en équilibre dans toutes les positions. On dit dans ce cas que l'aiguille aimantée est *folle*. Le point de la surface terrestre qui jouit d'une pareille propriété peut être considéré, comme se trouvant sur la direction de l'axe de l'aimant terrestre; du moins en admettant, que l'action magnétique du globe soit tout à fait comparable à celle d'un aimant ordinaire. Au contraire, à une faible distance de l'équateur, on trouve un grand nombre de lieux pour lesquels l'inclinaison est nulle, car l'aiguille de la boussole d'inclinaison se maintient horizontale. La courbe qui réunit tous ces points sans inclinaison a été nommée équateur magnétique; quoique sinueuse en réalité, on peut cependant la considérer comme se confondant, en beaucoup de ses points, avec un grand cercle dont le plan ferait un angle de 12° 30′ avec celui de l'équateur. Quand on quitte l'équateur pour s'avancer vers le pôle sud de la terre, on voit le pôle sud de l'aiguille s'abaisser de plus en plus au-dessous de l'horizon, jusqu'à ce que l'inclinaison devienne égale de nouveau à 90° en un point dont la latitude est d'environ 60° 30′.

785. **Boussole marine**. — La boussole, dont les navigateurs se servent pour la direction de leur navire, est constituée par une aiguille aimantée de déclinaison, qui doit toujours demeurer horizontale. Mais les mouvements continuels du navire rendraient impossible la conservation de l'horizontalité de l'aiguille, si l'on n'employait pas une disposition particulière que nous décrirons en peu de mots. En premier lieu, la boite cylindrique ou

hémisphérique, qui porte le pivot sur lequel repose l'aiguille aimantée, peut tourner autour de deux axes de suspension, perpendiculaires entre eux et fixés à des anneaux distincts. En second lieu, le fond de la boite est lesté avec des corps très-denses, afin que le centre de gravité du système se trouve toujours très-bas placé ; de cette façon, malgré les mouvements des supports extérieurs, le pivot se maintiendra toujours vertical, et par suite l'aiguille restera horizontale. Ce mode ingénieux de suspension a été inventé par le savant astronome Cardan.


Fig. 330.

L'aiguille aimantée est fixée à un disque circulaire très-mince de mica collé à une feuille de papier, sur les bords de laquelle sont tracées des divisions exprimant des degrés du cercle et des demi-degrés. Le disque se meut avec l'aiguille, qui y est fixée, et le diamètre qui représente le point de départ des divisions porte à ses deux extrémités les lettres N et S : ce diamètre prendra toujours, de lui-même, une position telle que sa direction coïncide avec celle de la méridienne du lieu. Pour que ce résultat soit obtenu, on a soin, avant de fixer l'aiguille sur le disque, de placer son axe magnétique à une distance angulaire du diamètre NS égale à la déclinaison du lieu. Dans ces conditions, le navigateur, en observant la boussole, connaît la route que suit le navire.

786. **Compensateur de Barlow.** — Malheureusement, une complication assez grave intervient : la terre n'agit pas seule sur l'aiguille de la boussole ; il y a encore les masses de fer du navire, qui prennent une aimantation différente selon la position qu'elles occupent par rapport à l'aimant terrestre et influent d'une manière variable sur les indications de l'instrument. On y remédie par l'emploi du compensateur de Barlow. Avant de quitter la rade, une opération préliminaire est effectuée : deux observateurs, munis chacun d'une lunette, se placent, à côté d'une boussole, l'un sur le rivage, l'autre sur le navire, et ils pointent les deux lunettes l'une vers l'autre. Si les masses de fer en question étaient sans influence, les angles, que feraient les aiguilles aimantées des deux boussoles avec les axes optiques des lunettes des deux observateurs, seraient rigoureusement égaux. Si, au contraire, une inégalité se manifeste, elle ne peut provenir que de la présence du fer dans le navire, et la différence des deux angles observés sert de mesure à l'action perturbatrice des masses de fer, eu égard du moins à la position actuelle qu'elles occupent par rapport à l'aiguille de la boussole. On recommence la même comparaison en faisant tourner le vaisseau successivement de 10° en 10°, et on note chaque fois l'écart observé. Quand ce premier travail est achevé, on pose la boussole sur le

rivage au-dessus d'un support parallélipipédique de bois dont les faces latérales sont percées de trous. On cherche alors par tâtonnement quel est celui de ces trous qui doit recevoir une tige en cuivre portant deux larges disques en fer doux, pour que la déviation de l'aiguille produite par cette masse de fer auxiliaire soit la même, dans toutes les positions du vaisseau, que celle qui est occasionnée par le fer du navire. Ce tâtonnement préalable opéré, on replace la boussole et son support sur le vaisseau, exactement à la place qu'ils occupaient d'abord, et désormais la correction tenant à l'influence du fer du navire sera possible. En mer, on fera une première observation de la boussole quand la masse auxiliaire, qui constitue le compensateur de Barlow, se trouvera éloignée ; puis une seconde observation, en plaçant le compensateur dans la position antérieurement déterminée et la différence des nombres obtenus donnera la valeur de la correction.

Cette méthode était assez exacte quand il s'agissait des anciens navires, dans la construction desquels le bois dominait ; mais aujourd'hui que la coque est complétement en fer, le compensateur de Barlow devient tout à fait insuffisant. Le calcul de la correction exige des opérations préliminaires plus compliquées.

787. — **Loi des répulsions et des attractions magnétiques.** — *Les attractions et les répulsions magnétiques varient en raison inverse des carrés des distances auxquelles elles s'exercent.* C'est la même loi qu'en électricité : aussi c'est en se fondant sur les principes que nous avons indiqués, et en se servant de l'appareil déjà décrit (*fig.* 327), que Coulomb a donné une démonstration expérimentale de la loi des répulsions et des attractions magnétiques. Un long barreau d'acier aimanté était suspendu à un fil métallique très-fin, par l'intermédiaire d'une chape très-légère. On avait déterminé à l'avance, quelle était la force de torsion nécessaire, pour maintenir le barreau à 1 degré de distance de sa position d'équilibre; cette force, dans l'une des expériences de Coulomb, était mesurée par 35° de torsion. On faisait ensuite descendre dans l'intérieur de la balance un second barreau aimanté d'une grande longueur, qu'on maintenait verticalement dans le plan du méridien magnétique, de manière que son pôle inférieur vînt prendre la place du pôle de même nom appartenant au barreau mobile. La répulsion avait lieu, et le barreau mobile allait se placer en équilibre à 24° de sa position initiale. Dans cette première phase de l'expérience, la force répulsive à la distance angulaire de 24° se trouvait mesurée par la force de torsion développée dans le fil, et correspondant à 24°, plus par la force directrice du globe représentée par le produit $24 \times 35 = 840$. En somme la force répulsive pouvait être exprimée par le nombre $840 + 24 = 864$.

Par une rotation du micromètre supérieur, de trois circonférences entières, on rendit la distance angulaire des deux pôles égale à 17°; dans cette seconde phase, la force répulsive était représentée par le nombre $3 \times 360 + 17 + 17 \times 35 = 1692$. Enfin, dans un troisième essai, il fallut faire tourner le micromètre de huit circonférences complètes pour réduire la distance angulaire à 12°. Cette fois, la force répulsive était équivalente à $8 \times 360 + 12 + 12 \times 35 = 3312$.

En résumé Coulomb avait obtenu :

DISTANCES.	FORCES RÉPULSIVES.
24	864
17	1692
12	3312

Si la loi que nous avons énoncée est exacte, on doit avoir :

$$\frac{1692}{864} = \frac{24^2}{17^2}, \quad \frac{3312}{1692} = \frac{17^2}{12^2},$$

ou bien

$$1692 \times 17^2 = 864 \times 24^2 = 3312 \times 12^2.$$

En un mot, si la loi est vraie, le produit de chaque force répulsive par le carré de la distance à laquelle elle agit doit être constant. Si on effectue le calcul, on trouve en effet pour les trois valeurs de ce produit des nombres peu différents et qui tombent dans les limites d'erreur que la méthode comporte. Une exactitude très-grande ne saurait être obtenue, car il ne faut pas se dissimuler que les sections des barreaux, placées de part et d'autre des pôles en regard, produisent un effet variable selon leur distance de l'extrémité de l'aimant : l'expérience n'est pas réalisée dans les conditions simples qui permettent de faire ressortir une loi.

La loi des attractions a été aussi démontrée par Coulomb; mais il a eu recours, dans ce cas, à une autre méthode susceptible d'une plus grande précision : la méthode des oscillations. Dans cette nouvelle méthode, le mouvement de l'aiguille mobile, qui est suspendue à un fil de soie sans torsion, est tout à fait comparable, quand cette aiguille oscille sous l'action attractive d'un barreau voisin, au mouvement d'un pendule qui oscille sous l'action de la terre. Alors la formule, que nous avons donnée (68), $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ dans laquelle l est constant, permet de déduire des valeurs de t que l'expérience fournit, le rapport des valeurs correspondantes de g, c'est-à-dire des intensités des forces qui provoquent le mouvement pendulaire.

PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

788. On peut aimanter les barreaux d'acier, soit par l'emploi d'aimants artificiels ou naturels, soit par l'action seule de la terre, soit enfin en recourant aux courants électriques. Nous n'avons à nous occuper, pour le moment, que des deux premiers procédés.

789. **Méthode de la simple touche.** — Un barreau d'acier trempé et à l'état naturel A'B' (*fig.* 331) est posé sur une table de bois horizontale. On appuie contre l'une de ses extrémités B' le pôle austral A d'un barreau aimanté formant comme le prolongement de A'B', et l'on observe avec soin quelles sont les modifications successives que va éprouver, au point de vue de ses propriétés magnétiques, le barreau à l'état naturel. On reconnaît, qu'au contact de l'aimant, il naît dans l'acier un pôle boréal B', c'est-à-dire de nom contraire au pôle excitateur. Le pôle boréal d'abord très-faible acquiert, quand le contact se prolonge, une énergie croissante ; en même temps, il se développe à une petite distance de B' sur la lame d'acier, un pôle austral, un peu plus loin un pôle boréal ; ces pôles très-faibles tous les deux s'éloignent progressivement vers l'extrémité opposée du parallélipipède d'acier. Si ce dernier est assez court, on n'y trouve plus, au bout d'un certain temps de contact, que les deux pôles B' et A' situés vers les extrémités, comme dans le cas d'un aimant ordinaire. Il est vrai d'ajouter qu'au moment où l'aimant excitateur est éloigné, les deux pôles B' et A' n'ont pas la même énergie : B' est plus fort que A', et la ligne neutre n'est pas au milieu; elle se trouve plus rapprochée de l'extrémité qui touchait le pôle A. Seulement, si le barreau à aimanter est assez court, au bout d'un certain temps il finit par acquérir de lui-même une aimantation régulière.



Fig. 331.

Voici comment les choses se sont passées. L'aimant employé, agissant par influence, a séparé, dans tous les points du barreau, les fluides magnétiques en quantités telles que la force coercitive de l'acier ne pouvait les maintenir séparés en totalité. Cette décomposition avait été, bien entendu, en décroissant avec la distance ; c'est ce qui explique que, dans les premiers moments, B' fût plus fort que A' ; mais quand l'influence a cessé, les fluides se sont peu à peu recombinés en partie dans toutes les sections. Cette recomposition a été plus faible, il est vrai, en A' qu'en B', et pourtant comme la force coercitive est constante, la limite de recomposition a été la même partout et l'aimantation régulière en a été le résultat.

Aussi par ce procédé qui a été soigneusement étudié par le docteur Robinson, physicien écossais, il n'est possible d'aimanter régulièrement,

même après un temps assez long, que des barreaux très-courts; quand la longueur devient un peu considérable, les barreaux acquièrent des pôles intermédiaires que nous avons déjà désignés sous le nom de points conséquents.

On distingue les pôles formés à l'aide de l'aiguille mobile de la figure 319. On voit l'une des extrémités du barreau qui vient d'être aimanté, repousser le pôle boréal de l'aiguille : c'est l'extrémité boréale du barreau. On reconnaît que l'autre extrémité du même barreau repousse l'autre pôle de l'aiguille : c'est donc l'extrémité australe.

790. **Méthode de la simple touche avec frictions.** — On aimante beaucoup plus rapidement l'acier et on évite la production des points conséquents en frottant le barreau à aimanter avec l'une des extrémités d'un aimant puissant D (*fig.* 332). Les frictions doivent toujours être faites dans le même sens; et, de temps à autre, il faut retourner le barreau pour soumettre également les différentes files de molécules à l'action du pôle excitateur. Quand ces frictions ont été réitérées un assez grand nombre de fois, le barreau d'acier est aimanté à saturation, et toute friction nouvelle ne lui fait désormais rien gagner.



Fig. 332.

Le résultat final est celui-ci : il reste sur le barreau d'acier, quand l'opération est terminée, un pôle B de nom contraire au pôle excitateur dans le bout de ce barreau qui a été touché le dernier par l'aimant, et un pôle de même nom A à l'autre bout, au point par lequel toutes les frictions ont commencé.

La théorie de l'aimantation est, dans ce cas, fort simple : en quelque point du barreau d'acier que soit placé le pôle actif, il fait apparaître au-dessous de lui un pôle *d* de nom contraire, et à chaque bout du barreau un pôle *a* de même nom, du moins quand la longueur AB n'est pas trop considérable. En d'autres termes, le pôle actif détermine, partout où il passe, la formation d'un point conséquent qu'il promène d'un bout du barreau à l'autre et qu'il laisse au point touché le dernier. Il suit de là, qu'à chaque nouvelle friction, le pôle appartenant au barreau D commence par détruire l'aimantation qu'il venait de déterminer, pour faire reparaître ensuite une aimantation nouvelle, qui (on serait tout d'abord porté à le croire) devrait avoir la même énergie que la première et qui, en réalité, se trouve plus forte. Le renouvellement des frictions a-t-il pour résultat de soumettre à l'action de l'aimant un plus grand nombre de files

moléculaires? ou bien, par ces alternatives de décomposition et de recomposition des deux fluides, produit-on une sorte de mouvement vibratoire qui favorise l'aimantation? Il serait difficile de décider actuellement cette question. Toujours est-il, que si on essaye la force du barreau que l'on aimante aux différentes époques de l'opération, on constate qu'elle va croissant avec le nombre des frictions jusqu'à une certaine limite qui dépend de la trempe du barreau et de l'énergie de l'aimant dont on s'est servi. On ne produit de points conséquents par la méthode de la simple touche qu'autant qu'on laisse le pôle excitateur en contact plus prolongé avec certains points du barreau, ou bien qu'on relève ce pôle avant d'avoir atteint l'extrémité B.

791. **Méthode de la touche séparée.** — Tous les autres procédés rentrant, quant à la théorie, dans celui de la simple touche, nous indiquerons simplement la manière d'opérer. Pour aimanter par la méthode de la *touche séparée*, on appuie les extrémités de la lame d'acier que l'on veut aimanter sur les pôles opposés A et B de deux aimants semblables D et C, dans une longueur de 3 centimètres environ. On porte ensuite les pôles A″ et B″ de deux autres aimants, inclinés à 25° sur l'horizon et qu'on tient à la main, juste au milieu du barreau et on les fait glisser l'un et l'autre à la fois, depuis le milieu jusqu'à l'extrémité correspondante, en renouvelant plusieurs fois les frictions, toujours dans le même sens. Comme les pôles en mouvement sont de mêmes noms que ceux des aimants fixes qui supportent la tige à aimanter, ils conspirent les uns et les autres à développer la même polarité, et l'on trouve, à la fin de l'opération, les pôles A′ et B′ distribués dans la lame, comme il a été dit à propos du procédé de la simple touche.

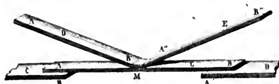


Fig. 333.

792. **Méthode de la double touche.** — La lame qu'on veut aimanter est disposée horizontalement, comme dans le cas précédent, sur les extrémités A et B de deux aimants D et C. Quant aux aimants mobiles, on les place soit parallèlement l'un à l'autre, soit avec une inclinaison de 30°, au milieu de la lame, en séparant seulement leurs extrémités A″ et B″ par un prisme en bois, contre lequel elles s'appuient. Les deux aimants mobiles et le prisme de bois forment alors comme un système de forme invariable qu'on promène à la surface de la lame à aimanter, d'abord du milieu vers l'une des extrémités, celle de droite par exemple, puis de droite à gauche jusqu'au bout de la lame, ensuite de gauche à droite. On opère aussi des

frictions alternativement en sens contraire, en ayant soin de terminer l'opération par une dernière friction exécutée de l'extrémité de gauche jusqu'au milieu, afin que toutes les sections de la lame aient été en contact, le même nombre de fois, avec les pôles actifs des aimants mobiles. La distribution des pôles dans la lame à aimanter est toujours facile à prévoir. Ils sont de noms contraires, aux pôles les plus voisins des aimants fixes contre lesquels ils s'appuient. L'aimantation est beaucoup plus forte quand on emploie la méthode de la double touche, que lorsqu'on a recours aux procédés déjà décrits; mais aussi les points conséquents se produisent plus souvent, à raison même de cette aimantation énergique. Il y a dans le cours de l'opération une sorte de réaction des pôles déjà formés sur les points voisins, réaction qui peut faire apparaître, en ces points, des pôles intermédiaires.

793. **Aimantation par l'action de la terre.** — Si la terre agit comme un aimant, elle doit décomposer, par influence, le fluide neutre dans le fer doux et l'acier, et provoquer ainsi leur aimantation. Cette conséquence de la théorie est parfaitement vérifiée par l'expérience. Prenez une barre cylindrique de fer doux qui soit bien à l'état neutre, et pour le reconnaître présentez chacune de ses extrémités au même pôle d'une aiguille de déclinaison, en ayant soin de maintenir cette barre perpendiculaire au plan du méridien magnétique. Si elle n'offre aucune trace d'aimantation, chacun de ses bouts devra attirer le pôle en question de l'aiguille mobile. L'état de neutralité étant reconnu, donnez à cette barre une direction parallèle à celle de l'aiguille d'inclinaison, de manière que les forces du couple terrestre agissent suivant l'axe du cylindre et puissent ainsi produire leur maximum d'effet; vous constaterez, à l'aide de la même aiguille de déclinaison, que, dans tous les cas, l'extrémité inférieure de la barre est un pôle austral et l'extrémité supérieure un pôle boréal. Retournez la barre bout pour bout, les pôles se porteront aussitôt d'une extrémité à l'autre, de manière à réaliser finalement le genre de polarité que nous venons d'indiquer. Enfin replacez la barre dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique; toute aimantation aura disparu.

En répétant les mêmes essais avec une tige d'acier on peut encore reconnaître l'aimantation que le globe détermine, mais elle est très-lente à se produire, et une fois obtenue, elle se conserve. La différence observée, dans ce cas, entre le fer doux et l'acier doit être encore attribuée à l'intervention de la force coercitive.

Toutefois, il est possible de rendre durable cette aimantation provoquée dans le fer par l'influence du globe, il suffit de soumettre le métal, pendant que les fluides magnétiques y sont maintenus séparés, à des actions mécaniques ou chimiques suffisamment énergiques. Ainsi, qu'au moment où la barre est parallèle à l'aiguille d'inclinaison, on la frappe à coups de mar-

teau dans le sens de l'axe, ou bien qu'on la passe à la filière, ou bien qu'on lui fasse subir une torsion, l'aimantation développée par le globe y persistera désormais. Le fer aura acquis, par le fait seul des ébranlements qui lui ont été communiqués, une force coercitive comparable à celle de l'acier. Ces résultats remarquables expliquent plusieurs faits depuis longtemps connus : les ciseaux à froid dont se servent les serruriers pour percer des trous dans la tôle sont toujours aimantés et leur pôle austral correspond à la pointe. Cela tient à ce qu'étant frappés par le marteau au moment où ils sont à peu près verticaux, et par suite dans une direction peu différente de celle de la force magnétique terrestre, ils ont conservé l'aimantation que l'influence du globe a déterminée. C'est pour un motif semblable que les croix de fer, les tiges de paratonnerre qui sont demeurées longtemps implantées au sommet des édifices, finissent par acquérir un magnétisme persistant.

794. **Circonstances qui influent sur le degré d'aimantation de l'acier.** — Le degré de trempe qu'on donne à l'acier a la plus grande influence sur l'aimantation qu'il peut recevoir. On a beau employer, dans le but de provoquer la décomposition du fluide magnétique neutre dans ce métal, des barreaux d'une grande puissance, on aura tout d'abord, il est vrai, une plus grande énergie, mais peu à peu les fluides magnétiques se combineront partiellement et l'on n'obtiendra jamais finalement, avec un même barreau, qu'un même degré de force qu'il sera impossible de dépasser et qui correspond à ce qu'on a nommé avec raison le point de saturation. Tout dépend donc et de la nature chimique du métal employé et de sa structure physique ; c'est cette dernière propriété qui se trouve surtout modifiée dans l'acier par le degré de trempe. Il résulte des expériences de Coulomb qu'un barreau trempé très-dur peut acquérir une aimantation plus forte et en même temps conserver plus longtemps le magnétisme libre qui y a été développé; mais, à côté de cet avantage, se trouve un inconvénient réel : c'est que la trop grande énergie de la trempe favorise la formation des points conséquents.

795. **Armatures des aimants.** — Dans tous les aimants, quelle que soit leur forme, le magnétisme libre tend à disparaître peu à peu sous l'influence de causes étrangères : 1° l'élévation de température ; 2° l'influence de la terre, alors que l'aimant occupe une position telle qu'il tendrait à prendre, sous cette influence, une polarité inverse de celle qu'il possède effectivement ; 3° la proximité d'autres aimants. On remédie, du moins en partie, à ces causes d'affaiblissement, en adaptant aux barreaux dont on veut conserver la puissance magnétique des armatures en fer doux. Il se développe dans celles-ci des pôles de nom contraire à ceux de l'aimant; ces pôles agissent, par attraction, d'une manière continue sur ceux du barreau aimanté et s'opposent à la recomposition mutuelle des fluides qui y sont accumulés.

795 *bis*. **Substances magnétiques.** — Un grand nombre de substances sont magnétiques; mais le nickel et le cobalt qui viennent immédiatement après le fer, s'en trouvent cependant très-éloignés.

ÉLECTRICITÉ

— 2e PARTIE —

CHAPITRE PREMIER

PILE VOLTAIQUE

796. **Expériences de Galvani.** — Les mouvements involontaires, qu'un animal exécute lorsque l'électricité traverse ses organes, avaient vivement frappé les savants qui en furent témoins les premiers. Au dix-huitième siècle, les esprits aventureux regardaient ces phénomènes, comme une révélation inattendue de la cause des mouvements volontaires. Ils se plaisaient à croire que c'était, par une émission de fluides électriques, que l'homme et les animaux provoquent la contraction de leurs muscles. Les nerfs ne seraient que des conducteurs destinés à transmettre le fluide parti des centres nerveux.

Galvani, médecin de Bologne, professeur de l'université, poursuivit cette idée ; mais au lieu de n'écouter que les rêves faciles de son imagination, il eut recours à l'expérience. Depuis six ans déjà, il étudiait l'action de l'électricité sur les animaux, en variant avec une infatigable persévérance toutes les circonstances où cette action se produit, lorsqu'il fut conduit à observer un phénomène qui devint l'occasion d'une des plus belles découvertes de la physique ; je veux dire la découverte de la pile de Volta.

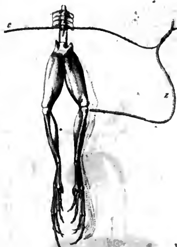


Fig. 334.

Galvani se servait, pour ses études, d'animaux tués récemment. Il avait reconnu que, sous l'influence d'une décharge électrique, ils s'agitent tout aussi bien que les animaux vivants ; et comme dans ces conditions les mouvements volontaires, qui troubleraient l'expérimentateur, n'existent plus, il devenait facile de reconnaître les effets dus à l'électricité seule.

Galvani séparait le train de derrière de la grenouille (*fig.* 334), le dépouil-

lait de sa peau, et plantait un crochet métallique entre les nerfs lombaires et l'extrémité de la colonne vertébrale adhérente. Un jour, par hasard, le crochet, qui soutenait ces parties ainsi séparées, fut mis en contact avec la balustrade que bordait un balcon de fer, au moment où les muscles de l'animal touchaient déjà le balcon : aussitôt des convulsions agitèrent ses membres. Galvani vit le phénomène, répéta l'expérience et de suite rapporta l'effet à sa vraie cause : l'électricité. Il fit alors des études pour rechercher la source de cette électricité et crut la trouver dans l'animal lui-même. Selon sa théorie, la grenouille est toujours chargée des deux électricités comme une espèce de bouteille de Leyde. Par l'arc métallique interposé, les deux électricités se réunissent; l'état électrique de l'animal étant ainsi troublé, la contraction se produit.

797. **Discussion de Galvani avec Volta.** — Volta répéta les expériences de Galvani et adopta un moment ses idées; mais il ne tarda pas à se poser en adversaire. Pour lui, l'animal était un simple conducteur, et l'électricité prenait naissance dans les parties hétérogènes. En un mot, l'animal n'était pas à la fois *agent* et *patient*, comme le voulait Galvani : il était frappé par l'électricité produite en dehors de lui.

Galvani soutint son opinion et exécuta, pour la soutenir, de très-belles expériences, qui ont enrichi la science de plusieurs faits importants. L'une d'elles consistait à isoler le nerf, à le séparer de la moelle épinière et ensuite à mettre le bout supérieur en contact avec le muscle : la contraction eut lieu. « On m'objectera peut-être, dit-il, que l'hétérogénéité existe encore « au point de contact du nerf et du muscle; mais alors je demanderai si « c'est parler sérieusement, si ce n'est pas « exprimer, en termes différents, cette vé« rité proclamée par moi, dès l'origine, « que la condition indispensable de la pro« duction de l'électricité consiste dans la « texture particulière des parties ani« males. » Il avait raison.


Fig. 335.

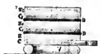
De son côté, Volta obtint des signes certains d'électricité avec l'arc métallique qui avait servi à la première expérience de Galvani.

Il prit une lame de zinc soudée à une lame de cuivre. La lame de zinc fut tenue à la main et la lame de cuivre posée sur le plateau supérieur de l'électroscope. Après avoir exécuté les diverses manœuvres nécessaires pour l'emploi de l'instrument, il trouva que le plateau supérieur s'était chargé d'électricité négative. Il in-

terpréta ce résultat en disant, que le zinc et le cuivre en contact constituaient une source constante d'électricité, et qu'en général, aux points de contact des métaux hétérogènes une force particulière se manifestait et séparait les deux fluides. A cette force, il donna le nom de *force électromotrice*.

798. **Découverte de la pile.** — Galvani avait cessé de vivre, lorsque Volta, poursuivant ses propres idées, tira partie d'une source aussi facile à obtenir, mais dont il était indispensable d'augmenter l'énergie. C'est alors, en 1800, qu'il imagina cette combinaison si simple et si merveilleuse que nous allons décrire dans un instant, et à laquelle sa forme a fait donner le nom de *pile*.

799. A l'apparition de la découverte de Volta, l'admiration fut grande et, pendant plus de quarante ans, le nom de Galvani ne resta guère qu'à l'état de souvenir un peu vague dans la science. Depuis, les découvertes modernes ont démontré que le médecin de Bologne avait raison tout autant que son adversaire, et qu'en réalité, le fait découvert par Galvani devait être envisagé à un double point de vue. Chacun des illustres adversaires ne voulut voir que l'une des faces de la question : ce fut leur tort commun. Mais la science leur doit de grandes découvertes ! elle confond leurs noms dans une égale reconnaissance.



800. **Pile de Volta.** — La pile de Volta se compose de rondelles de cuivre, de zinc, de drap mouillé qui sont posées successivement et toujours dans le même ordre, l'une au-dessus de l'autre. La première rondelle C (*fig.* 336), la rondelle de cuivre, repose sur une lame ou un anneau de verre V, qui sert à isoler l'appareil : au-dessus de cette rondelle on en pose une de zinc Z, puis vient la rondelle de drap mouillé D; ensuite on place cuivre C_1, zinc Z_1, drap mouillé D_1, cuivre C_2, zinc Z_2 et ainsi de suite, tant qu'on le désire. C'est un disque de zinc qui termine la pile à sa partie supérieure. Pour empêcher la colonne formée par les rondelles de s'écrouler accidentellement, on lui donne de la fixité à l'aide de trois montants de verre. M, M', M".

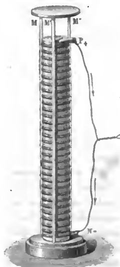


Fig. 336.

801. **Pôles.** — L'appareil ainsi construit est chargé d'électricité à peu près dans toute sa hauteur. S'il est bien isolé et s'il n'a été mis en communication avec le sol à aucune époque de sa construction, son extrémité inférieure N est chargée d'électricité négative, on l'appelle *pôle négatif*; l'extrémité supé-

rieure P, chargée d'électricité positive, est appelée *pôle positif*. Ces électricités se constatent aisément avec tout électroscope, même avec les moins sensibles. A mesure que l'on s'éloigne des extrémités, les quantités d'électricité libre vont en diminuant jusqu'au milieu qui est à l'état naturel.

802. **Courant.** — Pour conduire les électricités de la pile là où elles doivent être employées, on attache deux fils conducteurs NF, PF, presque toujours en cuivre, chacun à l'un des pôles de la pile. On dispose alors tout à son aise des deux électricités développées et il est évident qu'on a la possibilité, en mettant les fils NF et PF en rapport avec les appareils convenables, de répéter les diverses expériences d'électricité que nous connaissons déjà : il est donc inutile d'insister sur ce sujet. Il suffit d'ajouter que l'importance de l'appareil voltaïque résulte de la continuité des effets qu'il permet d'obtenir. A peine une expérience est-elle terminée, qu'on peut la recommencer presque aussitôt dans les mêmes conditions, car la pile répare très-promptement les pertes qu'elle subit.

Parmi les usages, que l'on fait de ces fils conducteurs, le plus fréquent est de les réunir l'un à l'autre soit directement par leurs bouts libres, soit par l'intermédiaire d'un corps conducteur. Les deux électricités de noms contraires, dont les pôles sont chargés, provoquent un mouvement continu des deux fluides à travers le fil. Deux *courants* d'électricité se meuvent en sens contraires : l'un de fluide négatif cheminant du pôle négatif au pôle positif, et l'autre de fluide positif marchant en sens inverse. Quand il s'agit de désigner ces deux courants, qui sont toujours simultanés, on se contente de nommer seulement le courant d'électricité positive, qui va du pôle positif au pôle négatif, et c'est celui-là qu'on appelle en un mot le *courant*. On dit que dans un fil le courant va de P en N quand l'électricité positive va de P vers N, et l'on sous-entend que le courant d'électricité négative marche en sens contraire.

802 *bis*. **Rhéophores.** — Les fils qui sont attachés aux pôles de la pile et qui servent à les réunir, s'appellent quelquefois les *fils conjonctifs*, nom qui rappelle le rôle qu'ils remplissent; le plus souvent, toutefois, on les nomme *rhéophores*, mot qui signifie qu'ils portent le courant.

803. **Pile à auge.** — La pile à colonne s'affaiblit après avoir fonctionné pendant quelque temps. L'une des causes de cet affaiblissement est le poids des disques qui a pour effet d'exprimer le liquide acide contenu dans les rondelles de drap placées vers le bas de la pile, et ces rondelles desséchées ne remplissent plus convenablement la fonction à laquelle elles étaient destinées. Pour rendre à l'appareil sa force première, il est nécessaire de le démolir, de laver les rondelles, de construire de nouveau la colonne abattue : toutes opérations longues et assujettissantes. Afin d'éviter ces inconvénients, Cruikshank eut l'idée de rendre la pile horizontale (*fig.* 337), d'enchâsser les rondelles C, Z de cuivre et de zinc soudées

ensemble dans une auge, qui se trouve ainsi divisée en compartiments et par une lame mince de liquide acide contenue dans chacun de ces com-

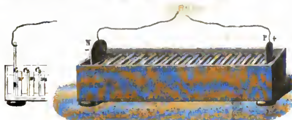


Fig. 337.

partiments il remplaça avec avantage la rondelle de drap de la pile à colonne. Quand la pile ne marche plus bien, l'auge n'a qu'à être retournée puis redressée, et remplie d'eau acidulée nouvelle pour que la pile soit remise en état.

804. **Pile à couronne.** — Tout assemblage, qui présentera les trois substances : cuivre, zinc, eau acidulée, se succédant dans l'ordre indiqué par Volta, formera une pile où rien d'essentiel ne sera changé; l'aspect seul aura varié. La pile à couronne que représente la figure 338 est composée de lames de cuivre C, C′, C″ et de zinc Z, Z′, Z″ soudées ensemble et recourbées en forme de fer à cheval. Chacune d'elles plonge à la fois dans deux des vases consécutifs désignés par V, V′, V″, et ses extrémités sont baignées par l'eau acidulée qu'ils contiennent. La pile commence par un premier cuivre C qui ne plonge dans aucun liquide, elle se termine par une lame de cuivre C″ à laquelle on n'ajoute pas une lame de zinc : comme l'aurait voulu Volta.



Fig. 338.

En parcourant cette pile de N en P, on voit que l'on a successivement, cuivre, zinc, eau acidulée; cuivre, zinc, eau acidulée, et ainsi de suite selon l'ordre que Volta avait prescrit. Le pôle négatif est en N, le pôle positif en P.

805. **Différences que présentent les piles précédentes.** — En confrontant la pile à couronne avec la pile de Volta, on reconnait bien que les pôles négatifs sont représentés par le même métal; tandis que les pôles positifs sont constitués : pour l'une par une lame de zinc, et pour l'autre par une lame de cuivre. La difficulté, que fait naître cette différence, s'éva-

nouit, si l'on observe que la pile à couronne serait identique à la pile à colonne, pourvu qu'au dernier cuivre l'on soudât une lame de zinc. A la pile à couronne, il manque donc une lame de zinc, mais il est évident que cette suppression n'est qu'un changement sans importance, si la pile est formée d'un grand nombre d'éléments, et surtout que les pôles ne peuvent pas en être changés.

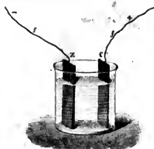


Fig. 339.

805 *bis*. **Dans un élément l'électricité négative se porte sur le métal attaqué.** — Mais pour éviter dorénavant tout embarras dans la détermination des pôles, établissons une règle applicable à tous les arrangements possibles.

Soit un vase de la pile à couronne (*fig.* 339) qui renferme une lame de zinc Z, et une lame de cuivre C plongées dans l'eau acidulée, cet ensemble formera ce qu'on appelle un *élément*. Le zinc est attaquable par l'acide, le cuivre l'est peu. Or l'expérience montre que, dans tous les cas, le métal attaqué se charge d'électricité négative et que le métal peu ou point attaqué se charge d'électricité positive.

Pour établir ce fait important, on attache au zinc un fil de métal quelconque *f*. On met ce fil en communication avec le plateau supérieur d'un électroscope condensateur, dont on touche le plateau inférieur avec le doigt. On retire le doigt, puis on enlève le plateau supérieur et l'on constate que l'électroscope est chargé d'électricité positive : le métal attaqué est donc une source d'électricité négative. On démontrerait de même que le cuivre donne l'électricité positive.

Règle générale, quels que soient les deux métaux, quelle que soit la dissolution dont on fait usage, toujours dans un arrangement semblable au nôtre l'électricité négative se développe sur le métal attaqué, et l'électricité positive sur le métal non attaqué. Aussi, pour cette raison et pour d'autres que nous développerons dans la suite, la force électromotrice de l'élément est-elle attribuée non pas, comme le voulait Volta, au contact des métaux qui constituent la pile, mais bien à l'action chimique que le liquide exerce sur l'un d'eux.

806. **Règle pour reconnaître les pôles d'une pile.** — Maintenant, veut-on déterminer les pôles d'une pile? on ne considère qu'un des *éléments;* on regarde de quel côté se trouve le métal attaqué par le liquide : c'est toujours de ce côté que le pôle négatif est placé, et le pôle positif correspond au métal non attaqué. Ainsi, dans la pile de Volta, décrite au § 800, une rondelle quelconque de drap mouillé a le disque de zinc placé au-dessous d'elle, et c'est en bas que se trouve le pôle négatif. Dans la pile

à couronne de la figure 338, le zinc nous paraît à gauche du liquide, et le pôle négatif se trouve à notre gauche.

807. **Pile de Wollaston.** — La pile à couronne a été modifiée par Wollaston et rendue très-commode et plus puissante. La pile de Wollaston (*fig.* 340) n'est autre que la précédente ; seulement, la lame de cuivre

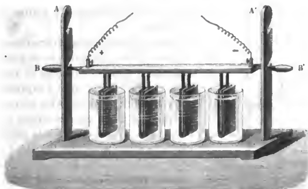


Fig. 340.

de chaque élément contourne la lame de zinc et l'enveloppe *sans la toucher :* de petits arrêts de bois, interposés entre les deux lames, empêchent tout contact. Cette première disposition rend les effets de la pile plus puissants. En outre, une barre transversale de bois BB' fixée convenablement, permet d'enlever à la fois toutes les lames des bocaux de verre. Dans l'intervalle de deux expériences, on peut donc mettre l'appareil hors d'atteinte de l'acide qui ronge le zinc : ce qui ménage la pile ; il faut renouveler moins souvent et le zinc qui se détruit et l'eau acidulée qui s'affaiblit. Des appuis A, A' reçoivent cette barre pendant que la pile est inactive.

II. — QUELQUES EFFETS CHIMIQUES DES PILES.

808. Avant de poursuivre la description des piles, il est indispensable de décrire quelques effets chimiques du courant, car ces effets jouent un rôle essentiel dans les perfectionnements que nous avons à faire connaître.

809. **Décomposition de l'eau acidulée.** — Le courant de la pile, en traversant l'eau acidulée, la décompose. Pour faire l'expérience, on se sert d'un verre V (*fig.* 341), dont le fond, percé de deux trous, est traversé par deux lames L, L' ou deux fils de platine. On verse dans le verre de l'eau accidulée, et on pose deux petites éprouvettes H, O renversées et pleines d'eau, au-dessus des fils métalliques. L'un des fils L' est mis en

communication avec le pôle positif P d'une pile, l'autre avec le pôle négatif N. Les fils se recouvrent aussitôt de nombreuses bulles de gaz, qui se dégagent dans les cloches correspondantes, et l'on ne tarde pas à reconnaître que dans l'éprouvette H placée au-dessus du fil négatif, se réunit un volume de gaz double de celui qui arrive dans l'autre éprouvette O. Au premier gaz, on reconnaît tous les caractères de l'hydrogène, à l'autre, ceux de l'oxygène.

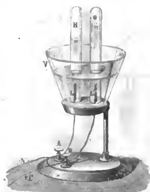


Fig. 341.

Ainsi, quand le courant traverse de l'eau acidulée, il la décompose, et au pôle négatif s'accumule l'un des éléments de l'eau, l'hydrogène. Ce résultat peut s'exprimer d'une autre manière, et cette forme nouvelle nous sera bientôt d'une grande utilité : l'hydrogène vient se déposer sur la lame par laquelle le courant *sort* du liquide, l'oxygène se dépose sur l'autre lame.

810. Décomposition des sels métalliques. — Une dissolution d'un sel métallique est aussi décomposée par la pile. On fait l'expérience en plongeant deux lames de platine dans une dissolution d'un sel métallique : d'argent, de cuivre, de zinc ou de tout autre métal (*fig.* 342). Pour le moment, nous préférerons une dissolution de sulfate de zinc. Chaque lame est mise en communication avec l'un des fils de la pile : le courant passe et la lame qui communique avec le pôle négatif se recouvre de zinc; ce qui se voit aisément : il suffit de regarder cette lame. L'acide et l'oxygène du sel marchant en sens contraire du courant, se portent vers la lame par laquelle arrive le courant, comme on peut le constater par l'analyse chimique. En résumé, le zinc se dépose sur la lame par laquelle le courant sort, l'acide et l'oxygène sur l'autre lame.

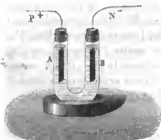


Fig. 342.

III. — PILES A COURANT CONSTANT.

811. Les changements que subit une pile dans les parties qui la constituent, produisent rapidement l'affaiblissement du courant ; et bientôt les effets, que l'on avait en vue de réaliser avec l'appareil, ne se manifestent

plus. Daniell est arrivé à combattre ces variations du courant, et à construire des piles constantes ; il y est parvenu en analysant, avec pénétration, les causes qui amenaient les modifications observées.

812. **Zinc amalgamé.** — Avant les travaux de Daniell, une première découverte avait déjà rendu la pile moins variable, en même temps qu'elle procurait une grande économie.

Kemp reconnut que le zinc amalgamé ne s'attaque pas au milieu de l'eau acidulée ; Sturgeon proposa d'employer dans la pile le métal ainsi préparé au lieu du zinc ordinaire, et il fit voir que l'appareil étant mis en activité dans ces nouvelles conditions, le zinc s'use en moins grande quantité tout en produisant de meilleurs effets. De là, dans toutes les piles l'emploi du zinc amalgamé : c'est une économie et de zinc et d'acide, et même de temps, car la pile n'a pas besoin d'être renouvelée aussi souvent.

813. **Courant intérieur de la pile.** — Les deux pôles d'une pile réunis par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs corps conducteurs, perdent leurs électricités qui cheminent d'un mouvement continu pour constituer ce que nous avons appelé le *courant*. Mais la pile envoie, sans relâche, de l'électricité positive vers le pôle positif, de l'électricité négative vers le pôle négatif : l'intérieur de l'élément se trouve donc parcouru par les deux électricités qui cheminent en sens contraire, il est le lieu d'un courant que nous appellerons le courant intérieur et qui va du pôle négatif au pôle positif. La figure 343 dans laquelle les flèches indiquent le sens du courant, rend sensible l'indication que nous venons de donner.

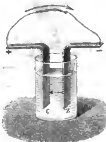


Fig. 343.

814. **Modifications subies par une pile en activité.** — Le courant intérieur de la pile traverse, dans chaque cellule de la pile à auge ou dans chaque bocal de la pile de Wollaston, un liquide décomposable, il y pénètre par une lame de métal, il en sort par une autre lame également métallique. Le liquide doit donc être décomposé. Ainsi, prenons comme exemple la pile à couronne. Lorsque les deux pôles seront réunis, un courant cheminera, dans chaque vase, du zinc vers le cuivre, à travers le liquide, qui sera décomposé.

815. *Dépôt d'hydrogène.* — Au début, ce liquide est de l'eau acidulée et l'élément de pile forme comme un voltamètre. L'hydrogène, entraîné dans le sens du courant, se dégage sur la lame de cuivre par laquelle le courant sort, et l'oxygène, porté en sens inverse, vient sur la lame de zinc pour se combiner en oxydant le métal.

En observant une pile en activité, on voit, en effet, se développer sur la

lame de cuivre un gaz qu'il est aisé de recueillir et de reconnaître pour de l'hydrogène. Daniell y est parvenu en constituant un élément (*fig.* 344) dont les lames étaient disposées comme celles d'un voltamètre : au-dessus de la lame de cuivre P, était disposée une éprouvette, et aussitôt que le courant était en activité, l'éprouvette se remplissait d'hydrogène, rien ne se dégageait sur le zinc amalgamé Z. L'hydrogène ainsi développé produit une double modification de la pile. Il a pour premier effet de rompre, en partie, la série des corps conducteurs dont l'appareil est composé; il couvre le cuivre et forme sur lui une couche très-impropre au passage des électricités qui doivent pouvoir continuer leur mouvement primitif. Mais c'est là le moindre de ses inconvénients. Sur le cuivre qu'il revêt, l'hydrogène condensé constitue une substance très-oxydable, qui a le même rôle électro-moteur que le zinc, son action opposée à la force électro-motrice principale en détruit une partie. La pile diminue d'énergie : le courant extérieur est moins puissant.

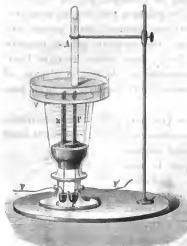


Fig. 344.

816. *Affaiblissement de l'acide.* — A mesure que la pile fonctionne, l'eau acidulée, qui sans cesse attaque le zinc, va en s'affaiblissant, et quand l'appareil a été assez longtemps en activité, le liquide ne renferme plus de grandes proportions d'acide libre : telle est la seconde modification subie par chaque élément.

817. *Dépôt de zinc.* — Lorsque l'acide a dissous une grande quantité de zinc, la décomposition qui s'opère dans chaque cellule ne porte que peu ou point sur l'eau acidulée, elle porte sur le sulfate de zinc formé, et le zinc vient, entraîné par le courant, se déposer sur la lame de cuivre. De là une altération très-grave : le liquide est de chaque côté en présence de deux lames de zinc qu'il peut attaquer. Deux forces électro-motrices agissent en sens inverse et se détruisent. La pile ne marche plus.

818. *Résumé.* — En résumé, les parties qui composent une pile subissent trois modifications : 1° l'eau acidulée s'altère en attaquant le zinc, elle se transforme en une dissolution de sulfate de zinc ; 2° le cuivre se recouvre d'une couche d'hydrogène doublement nuisible ; 3° le cuivre, quand la pile a déjà fonctionné, se recouvre de zinc.

On pourrait ajouter que le zinc en se dissolvant diminue d'épaisseur ;

mais ce changement d'épaisseur est sans importance : on peut le reconnaître en construisant les piles avec différentes lames.

819. **Pile de Daniell.** — Daniell a construit une pile, dont toutes les parties se reconstituent dans leur état initial, à mesure qu'une modification vient à se produire.

Pour éviter que le cuivre ne se recouvre d'hydrogène ou de zinc, il le place en contact avec un liquide qui ne contient ni eau acidulée ni sulfate de zinc, mais bien du sulfate de cuivre. Il donne à cette lame de cuivre la forme du vase CC' (*fig.* 345) où le liquide est contenu. Le zinc, comme toujours, plonge dans de l'eau acidulée, mais se trouve contenu dans un vase MM' formé par une membrane poreuse. Par suite de la porosité de ce vase, une couche continue de liquide se trouve entre le zinc et le cuivre ; et l'appareil offre la série non interrompue de métaux et de liquides qui constitue une pile voltaïque. Mais, on l'a déjà compris : le courant intérieur dans sa marche à travers le sulfate de cuivre, ne pourra avoir d'autre effet que de le décomposer et de former un dépôt de cuivre sur la lame de cuivre qui augmentera un peu d'épaisseur; résultat sans importance. Sur cette lame, on aura évité entièrement et le dépôt d'hydrogène et celui du zinc qui changeaient l'économie intérieure de l'appareil. En même temps, l'acide sulfurique provenant de la décomposition du sulfate de cuivre se portera vers le zinc pour continuer l'action initiale.

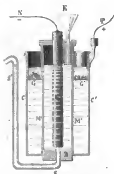


Fig. 345.

820. Cependant un mal évité, un autre renaît : la dissolution de sulfate de cuivre s'appauvrit à mesure que la pile fonctionne et que le cuivre se dépose. Il faut y remédier. Daniell dispose dans ce but vers le haut de la lame de cuivre contournée en forme de cylindre une galerie GG' percée de trous, et il la remplit de cristaux de sulfate de cuivre. La galerie est envahie par la dissolution qui au fur et à mesure de son appauvrissement répare ses pertes en dissolvant les cristaux en contact avec elle.

821. Des trois altérations de la pile, Daniell a donc d'un seul coup empêché deux d'entre elles de se produire; il en reste une troisième, celle de l'eau acidulée. Pour la combattre, Daniell s'est résigné à renouveler peu à peu le liquide dont il est impossible de prévenir l'altération. A cet effet, un entonnoir E placé au-dessus de chaque élément laisse couler goutte à goutte de l'eau acidulée; une ouverture pratiquée au fond du bocal donne issue à la dissolution chargée de sulfate de zinc que son poids spécifique fait descendre à mesure qu'elle se forme. Afin que l'écoulement soit bien réglé et que le niveau demeure constant, à l'ouverture du fond est adapté

un tube SS' recourbé comme la figure l'indique et dont le bec laissera couler la dissolution saline.

Cette disposition n'empêche pas le zinc d'être baigné en partie dans le sulfate de zinc produit; mais si l'écoulement est régulier, si le travail auquel la pile est employée n'a pas de variations notables, un liquide de constitution sensiblement constante passe et se renouvelle dans les bocaux.

822. Simplification de la pile de Daniell. — La pile ainsi construite est théoriquement d'une constance parfaite; dans la pratique, elle demeure à peu près constante pendant plusieurs jours. Mais la nécessité de renouveler l'eau acidulée, l'embarras occasionné par le tube qui force d'avoir des tables particulières pour poser les bocaux, a engagé les physiciens à employer la pile de Daniell en supprimant ces parties gênantes. L'appareil est alors réduit aux parties qu'indique la figure 346, où la membrane est d'ailleurs remplacée par un vase poreux de porcelaine dégourdie V. L'expérience a montré que la pile dont l'eau acidulée n'était pas renouvelée était beaucoup moins constante : toutefois, elle l'est suffisamment dans la plupart des cas. Aujourd'hui, la pile simplifiée est employée de préférence à la pile construite par l'inventeur : il n'y a d'exception que pour les recherches très-délicates de physique, qui exigent un courant constant pendant plusieurs jours.

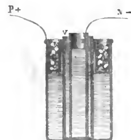


Fig. 346.

823. Modifications de la pile de Daniell. — Ainsi, l'Administration des télégraphes emploie les piles de Daniell sans réservoir et sans tube. D'ailleurs rien d'essentiel n'est changé aux dispositions que nous avons fait connaître : seulement la lame de cuivre est remplacée par un gros fil de cuivre soudé au zinc et portant une petite coupe percée de trous sur laquelle on pose les cristaux de sulfate de cuivre. L'eau acidulée est remplacée par de l'eau ordinaire au milieu de laquelle le zinc, même non amalgamé, n'est attaqué que très-lentement quand la pile ne fonctionne pas.

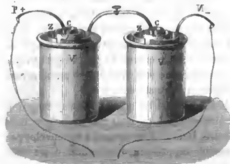


Fig. 347.

La figure 347 représente une pile analogue : la seule différence, c'est qu'un cylindre de cuivre tient lieu du fil de la pile des télégraphes.

824. Pile à sulfate de mercure. — A travers le vase poreux, qui est le plus souvent constitué par de la porcelaine dégourdie, la dissolution de sulfate de cuivre filtre toujours peu à peu, et aux points de la lame de zinc, où elle parvient, elle laisse déposer une couche de cuivre. De là, les effets les plus fâcheux : une petite pile prend naissance dans la pile même; le cuivre déposé, le zinc et le liquide forment un élément, mais un élément dont les pôles sont toujours réunis, et qui est par suite en activité continnelle. Le zinc se trouve rongé sans relâche, et cela sans effet utile : le mouvement d'électricité est absolument local.

Dans ces derniers temps M. Marié-Davy a eu l'heureuse idée de remplacer le sulfate de cuivre par du sulfate de mercure. Lorsque le sulfate de mercure filtre à travers le vase poreux, du mercure se dépose sur le zinc et entretient l'amalgamation que l'expérience a montrée si avantageuse. Par ce moyen, toute filtration devient non-seulement sans danger, mais, jusqu'à un certain point, profitable. Ce perfectionnement a nécessité une modification nouvelle, car une lame de cuivre ne peut pas être plongée dans la dissolution d'un sel de mercure sans être attaquée et dissoute : celle des piles précédentes est remplacée par un cylindre de charbon des cornues à gaz, corps bon conducteur et sur lequel le mercure se dépose comme le cuivre se déposait dans la pile à sulfate de cuivre. Le mercure déposé coule au fond du vase poreux où on le retrouve pour l'utiliser de nouveau.

Le sulfate de mercure est très-peu soluble, il faut l'employer en poudre délayée dans de l'eau, qui le dissout lentement à mesure que la marche de la pile altère la dissolution. Malheureusement, si l'on veut une pile un peu active, la dissolution devient de suite tellement épuisée, que le courant intérieur ne trouve plus dans le vase poreux que de l'eau à décomposer, et l'on n'a plus qu'une pile de Wollaston. Tel n'est pas le cas quand il s'agit du fonctionnement des télégraphes et de quelques autres appareils. Aussi la pile de M. Marié-Davy a-t-elle été mise à l'essai par l'administration, et nous ne serions pas surpris qu'on la trouvât préférable à toutes celles qui l'ont précédée.

825. Pile de Grove. — La marche satisfaisante des piles de Daniell simplifiées avait montré que, pour obtenir un courant constant, il fallait surtout éviter le dépôt et l'adhérence des bulles d'hydrogène et le dépôt de zinc sur la lame de cuivre. Dès lors une multitude de dispositions nouvelles ont été imaginées, toutes dérivant des mêmes principes. Les inventeurs de ces appareils perfectionnés ont conservé le vase poreux qui empêche le dépôt du zinc ; ils ont tous cherché à empêcher l'hydrogène de se développer sur le cuivre, ou bien encore ils ont essayé de l'absorber aussitôt. Parmi eux, Grove parvint à ce dernier résultat au moyen de l'acide azotique dont les propriétés oxydantes sont bien connues. Il place, dans le vase poreux, de l'acide azotique; mais comme cet acide dissout le cuivre rapidement,

Grove a été obligé de recourir au platine. Quand la pile est en activité, la dissolution d'acide azotique est décomposée; l'hydrogène, entraîné par le courant, se porte vers la lame de platine, mais il disparaît presque aussitôt en se combinant à une partie de l'oxygène de l'acide azotique; par suite de l'eau et de l'acide azoteux se forment, et tout dépôt d'hydrogène est impossible.

La pile de Grove est assez constante, moins cependant que la pile de Daniell, mais elle lui est supérieure quand un courant énergique est nécessaire.

826. **Pile de Bunsen.** — La pile de Grove est d'un prix élevé à cause de l'emploi du platine, Bunsen l'a rendue beaucoup moins coûteuse en remplaçant ce métal par des cylindres de coke qui sont bons conducteurs de l'électricité. Aujourd'hui, au charbon de Bunsen, on substitue ce charbon compacte, que l'on trouve déposé sur les parois des cornues, où l'on fabrique le gaz.

La pile de Bunsen, telle qu'elle est construite actuellement (*fig.* 348), se

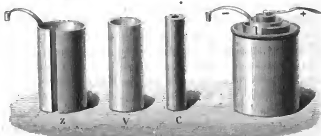


Fig. 348.

compose d'un vase poreux V en porcelaine dégourdie qui contient de l'acide azotique, au milieu duquel plonge un cylindre de charbon C. Ce vase de porcelaine est au centre d'un bocal de verre ou d'un pot de grès qui renferme de l'eau chargée d'acide sulfurique. Une lame de zinc Z épaisse, amalgamée et contournée en cylindre, entoure de près le vase poreux.

Pour réunir plusieurs éléments, on creuse les charbons d'un trou conique, dans lequel vient s'enfoncer un cône métallique qui termine une lame de cuivre soudée à la partie supérieure de chaque lame de zinc. On peut aisément, de cette manière, mettre en série continue un grand nombre d'éléments : le charbon, demeuré libre à l'une des extrémités, représente le pôle positif de la pile, et le zinc de l'élément situé à l'autre extrémité représente le pôle négatif.

826 *bis*. **Pile de Smee.** — Une pile à courant constant et assez simple a été imaginée par Smee, qui s'est appuyé sur ce fait, que l'hydrogène

n'adhère nullement ni au platine, ni à l'argent, quand ces métaux sont recouverts de noir de platine; de sorte que ce gaz ne peut avoir aucune fâcheuse influence pour diminuer l'intensité du courant. La pile est donc formée d'une lame de zinc amalgamé et d'une lame de platine ou d'argent recouverte de noir de platine; toutes deux plongent dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Lorsque l'auge qui contient le liquide est d'une grande capacité, la constance de la pile est remarquable.

CHAPITRE II.

EFFETS DE LA PILE.

A l'aide de la pile, on peut produire les trois grands ordres de phénomènes naturels : 1° des phénomènes physiques; 2° des phénomènes chimiques; 3° des phénomènes physiologiques. Ces trois modes d'action de l'appareil voltaïque vont être passés en revue.

I. — EFFETS PHYSIQUES.

827. **Étincelle.** — Il a déjà été parlé de l'étincelle qui jaillit lorsque les deux fils conducteurs attachés aux pôles sont mis en rapport l'un avec l'autre. Mais ce phénomène n'a été signalé qu'en passant, comme un de ceux que la pile devait nécessairement faire apparaître, puisque chacun des fils se trouve chargé d'une électricité contraire. Toutefois, il mérite de fixer notre attention, car, ce que l'on ne pouvait guère prévoir, les deux fils, approchés lentement l'un de l'autre, arrivent jusqu'au contact sans que rien se manifeste. L'étincelle ne se montre qu'au moment où les fils sont écartés. Du moins, les phénomènes se passent de cette manière avec une pile formée de 10, 20 ou 60 éléments, semblables à ceux dont on se sert habituellement.

828. M. Gassiot a observé ces résultats, en attachant les deux fils à deux boules A, B (*fig.* 349), portées chacune par un pied isolant. Une vis micrométrique permettait de les placer à une distance connue, et le savant observateur a constaté qu'à une distance même de $\frac{1}{2}$ millième de millimètre, il n'y avait pas d'étincelle qui apparût.

Ce résultat est la conséquence de la faible tension des électricités qui

chargent les deux pôles. A un instant donné, si l'on détermine la quantité d'électricité située sur l'unité de surface de chaque fil, on trouve qu'elle est très-minime comparée à celle qui charge une même étendue prise sur le cylindre d'une machine électrique faiblement électrisée. De là, une répulsion très-petite du fluide électrique sur lui-même, c'est-à-dire une faible tension aux pôles de l'appareil voltaïque. De là encore entre les deux électricités, quand elles sont mises en présence, une attraction insuffisante pour briser la plus mince couche d'air qui s'oppose à leur réunion. Mais aussitôt que les fils sont réunis, le mouvement d'électricité a lieu, et à l'instant où les fils sont séparés, ce mouvement se continue encore pendant un temps très-court : c'est alors qu'on voit l'étincelle se produire.

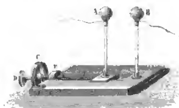


Fig. 349.

Persuadé que la faiblesse de la tension sur les pôles était la cause qui empêchait l'étincelle de jaillir, et sachant que cette tension augmente avec le nombre des éléments, M. Gassiot résolut de construire une pile formée d'éléments assez nombreux pour que l'étincelle apparût dès que les pôles seraient approchés : il réussit complétement. Avec des vases de verre, vernis extérieurement à la gomme laque et contenant de l'eau ordinaire, des lames de zinc et de cuivre, 3 520 éléments furent formés; les vases posaient d'ailleurs sur des plaques de verre sèches et vernies afin que l'isolement fût complet. On obtint des étincelles de $\frac{1}{2}$ millimètre de longueur, et pendant cinq semaines sans interruption, nuit et jour, les étincelles continuèrent à jaillir.

829. Ici, il est impossible de ne pas se poser la question suivante : La moindre machine électrique n'est-elle pas une source d'électricité plus puissante que la pile la plus énergique ? Hâtons-nous de répondre négativement, et invoquons, comme une première preuve, la continuité des phénomènes. Une pile donne, si on le désire, des centaines d'étincelles à la minute, car l'appareil régénère les électricités presque aussitôt qu'elles sont neutralisées; elle est donc en cela incomparablement supérieure à la machine électrique. Mais cette première preuve est loin de nous suffire : nous reviendrons sur la question dans le paragraphe 831.

830. **Chaleur produite par le courant.** — Un fil métallique d'un petit diamètre, qui est attaché aux deux extrémités A et B (*fig.* 350) des fils conjonctifs et qui complète la série des conducteurs nécessaires au passage du courant, s'échauffe, rougit, arrive à la température blanche, entre en fusion, se volatilise, selon les circonstances de l'expérience.

Avec une pile d'un petit nombre d'éléments à surfaces de peu d'étendue, il n'est possible de faire rougir qu'un fil très-fin et très-court. A mesure que le nombre et la surface des éléments augmentent, les dimensions du fil capable de rougir sous l'influence du courant croissent à leur tour. Voici, comme exemple, deux résultats extrêmes : Wollaston, avec un seul élément formé par des lames de 7 centimètres carrés de surface, a réussi à faire rougir, sur une longueur extrêmement faible, un fil de platine dit *à la Wollaston*, dont le diamètre était moindre que $\frac{1}{100}$ de millimètre. Children avec une pile de 25 éléments formés par des lames de 3^{mq},50 de surface, a fait fondre un fil de platine de 7 centimètres de longueur et de 5 millimètres de diamètre.

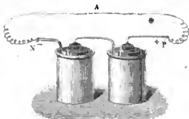


Fig. 350.

La nature de la substance, qui compose le fil, exerce une grande influence sur le phénomène. Si l'on attache, à la suite l'un de l'autre, des fils de platine et d'argent de même longueur et de même diamètre, le courant fait rougir de préférence le platine qui est le métal le moins conducteur de l'électricité. On peut, du reste, considérer ce résultat comme général. Si le fil fin interposé sur le passage du courant est formé d'un métal, le fer, le plomb ou tout autre, qui brûle à une haute température, la combustion a lieu ; mais elle n'est qu'un effet secondaire, conséquence de l'échauffement du fil. Enfin les corps liquides s'échauffent aussi par le passage du courant, et l'élévation de température est d'autant plus considérable que la colonne liquide traversée est moins conductrice de l'électricité.

831. **Comparaison du courant de la pile avec celui d'une batterie de bouteilles de Leyde.** — La décharge d'une batterie, qui traverse un fil métallique très-fin, le fait rougir pendant un instant très-court, et pour recommencer l'expérience, il faut condenser de nouveau l'électricité produite par un grand nombre de tours du plateau de la machine. Une pile réalise, par la décharge continue de ses pôles, ce même phénomène d'incandescence non pas pendant le temps inappréciable que dure la décharge ou le courant de la batterie, mais elle le réalise, pendant des heures entières, et déverse sans relâche dans le fil de l'électricité comme la batterie ne peut en envoyer que par intermittences. La valeur de la pile comme source électrique est bien manifestée par cette comparaison que nous empruntons à Faraday.

832. **Applications.** — Le fil de platine, rendu incandescent par l'électricité, est employé avec avantage dans certaines opérations chirurgicales. Il coupe et en même temps il cautérise la plaie ; il a de plus l'avantage de

n'agir que dans une étendue restreinte; en outre, il s'introduit dans les parties profondes quand il est encore froid, et, par suite, sans qu'il y ait aucun danger pour les organes voisins de celui sur lequel il faut opérer.

On a aussi proposé d'utiliser l'incandescence du fil pour mettre le feu aux mines. Au milieu d'une cartouche spéciale, viennent se réunir par un fil métallique très-fin les extrémités de deux rhéophores, dont l'un est fixé à une pile très-éloignée, et dont l'autre est d'abord libre de tout contact avec le même appareil : au moment voulu, ce dernier rhéophore est mis en communication avec la pile : le fil s'échauffe et la mine éclate (*).

833. **Lumière électrique.** — La lumière dite électrique n'est autre que la lumière éblouissante produite par l'incandescence de deux charbons traversés par le courant. On la produit, en réunissant deux tiges minces de charbon des cornues C et C' (*fig.* 351) avec les pôles d'une pile à éléments larges et nombreux; les deux extrémités, placées en regard, sont taillées en pointe. On fait arriver ces pointes au contact, afin que le courant s'établisse; puis on les éloigne peu à peu. Le courant continue à passer, et aussitôt les charbons deviennent éclatants de lumière ; l'existence d'un arc lumineux, d'une teinte violacée, rend manifeste le passage du courant à travers l'air atmosphérique. De temps à autre, des particules incandescentes se détachent du charbon qui est en rapport avec le pôle positif et rejoignent l'autre charbon qui s'accroît et bourgeonne.

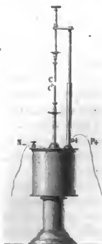


Fig. 351.

Ces aspects, présentés par l'arc lumineux et les charbons, s'aperçoivent très-bien quand, au moyen d'un système de lentilles, on forme une image agrandie du phénomène sur un écran. On les observe tout à l'aise, lorsqu'on regarde directement avec des lunettes à verre très-sombre : les yeux ne sont plus éblouis, et une observation prolongée devient possible.

834. Les charbons incandescents brûlent au contact de l'air, et quoique, par suite de la structure compacte de la matière employée, la combustion soit lente, elle ne laisse pas que d'être très-sensible. Les extrémités C et C' ne tardent pas à se trouver trop loin pour que le courant continue à passer à travers l'air : dès lors, toute lumière disparait jusqu'à ce que les charbons aient été remis en contact et écartés de nouveau. Cette intermittence fâcheuse doit être évitée.

(*) On arrive aujourd'hui à produire l'inflammation simultanée de plusieurs mines par un procédé tout différent, qui est fondé sur l'emploi de l'étincelle d'induction.

M. Foucault est parvenu à faire servir le courant même, qui produit la lumière, au maintien d'une distance invariable entre les deux charbons. La lampe électrique, que construit M. Dubosq, remplit le même but d'une manière analogue.

835. Éclairage électrique. — La vive lumière, qui émane des charbons, a été bien souvent essayée pour l'éclairage des villes, et jusqu'ici elle l'a été sans succès. Il nous paraît peu probable qu'on réussisse jamais dans les conditions où l'on se place actuellement. Comme expérience d'essai, ce sera un spectacle qui plaira et émerveillera toujours; mais qu'un soir, une ville tout entière comme Paris se trouve illuminée par ces petits soleils disséminés sur les places et dans les carrefours, et les habitants, éblouis, fatigués par l'éclat insupportable d'une lumière aussi vive, demanderont à revenir immédiatement au mode actuel d'éclairage. On pourrait, à la vérité, amortir l'éclat de la lumière par des verres dépolis convenablement disposés, mais alors la perte serait considérable, et comme la production de l'électricité est très-coûteuse, nous ne voyons pas trop l'avantage qu'il y aurait à substituer cette lumière affaiblie à celle du gaz. Il en est enfin qui ont proposé une seule lumière placée sur un monument élevé. Un mot suffit pour faire comprendre la valeur d'une semblable proposition : Paris ainsi éclairé se trouverait plongé dans une obscurité presque complète. Pour s'en convaincre, il suffit de se demander quelles sont les rues d'où l'on peut voir le Panthéon qui est cependant le plus élevé de tous les monuments de la capitale.

836. Usages de la lumière électrique. — Cependant, la lampe électrique n'est pas sans usage. Déjà elle est employée en optique pour remplacer le soleil dans les expériences qui exigent une vive lumière. Elle a rendu des services pour exécuter pendant la nuit des travaux de terrassement ou de déblai qu'il était nécessaire d'achever promptement. La marine a fait des essais qui paraissent heureux pour la transmission des signaux de nuit. Enfin, il y a lieu d'espérer qu'un jour cette lumière sera utilisée pour l'éclairage des phares, qui alors acquerront une portée beaucoup plus considérable et préviendront plus tôt les marins de l'approche des côtes dangereuses. Si l'on a retardé jusqu'à ce jour cette application, c'est que la lumière n'a pas un éclat absolument fixe; des intermittences fâcheuses tromperaient le navigateur et l'empêcheraient de reconnaître la côte dont il approche : il pourrait confondre ces intermittences accidentelles avec les éclipses qui sont combinées en nombre et en durée pour caractériser un phare et le différencier de tous les autres.

837. Transport par le courant. — On doit à Porrett d'avoir découvert que le courant, en traversant un liquide peu conducteur, entraîne ce liquide du pôle positif vers le pôle négatif. Pour faire l'expérience, on emplit à moitié, avec de l'eau ordinaire un bocal de verre V et un vase

poreux V″ (*fig*. 352) placé dans son intérieur. Les niveaux étant primitivement les mêmes, si dans l'eau de V plonge le pôle positif de la pile, dans l'eau de V″ le pôle négatif, on reconnaît, par la différence des niveaux, que le liquide passe peu à peu dans le vase qui contient le pôle négatif. Avec les liquides bons conducteurs, le phénomène est à peine sensible.

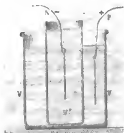


Fig. 352.

838. **Autres effets physiques de la pile.** — Outre les effets physiques que nous venons de signaler, la pile en produit encore plusieurs autres: le courant agit sur les aiguilles aimantées, il agit sur les corps conducteurs dont il s'approche ou dont il s'éloigne, il attire et repousse les conducteurs traversés déjà par un autre courant. Mais ces divers effets ont une telle importance qu'il est d'usage de les traiter à part : c'est ce que nous ferons, dans des chapitres spéciaux.

II. — EFFETS CHIMIQUES.

839. **Décomposition de l'eau.** — Déjà dans le § 809, quelques-uns des effets chimiques de la pile ont été étudiés; la décomposition de l'eau par le courant nous a particulièrement occupé; il est nécessaire d'y revenir en ce moment, pour compléter nos connaissances sur ce point. Une circonstance du phénomène mérite toute notre attention; c'est la séparation des deux gaz qui se dégagent sans mélange et isolés l'un de l'autre dans les cloches du voltamètre, et qui ne se développent que sur les lames métalliques L, L′, qu'on nomme habituellement les *électrodes*. Comment peut-on concevoir que le courant qui décompose l'eau, n'en sépare pas les éléments sur tout le trajet qu'il parcourt et que les gaz ne s'élèvent pas de tous les points du liquide traversé? Si la décomposition n'a lieu qu'au contact des deux lames entourées de liquide, comment ne donne-t-elle pas à la fois les deux gaz là où elle s'effectue? La séparation des gaz dégagés a beaucoup étonné tout d'abord, et l'on a été très-embarrassé d'en trouver une explication plausible. Grotthuss cependant y est parvenu, et sa théorie ne laisse rien à désirer. La voici :

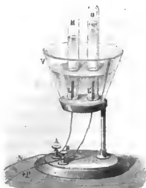


Fig. 353.

840. **Théorie de Grotthuss.** — Soit entre l'électrode positive P et la lame

négative N (*fig.* 354) une file de molécules d'eau, dont l'hydrogène sera représenté par H_1, H_2, H_3, etc., et l'oxygène par O_1, O_2, O_3, etc. Grotthuss imagine que le courant agit sur toutes ces molécules, fait cheminer l'oxygène

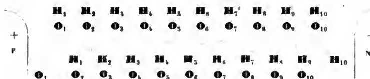


Fig. 354.

vers le pôle positif, l'hydrogène vers le pôle négatif. Par suite de ce mouvement général, la première molécule O_1 d'oxygène est complétement séparée de la molécule H_1 d'hydrogène, et elle se dégage sur la lame de platine P. De même, la dernière molécule H_{10} d'hydrogène se trouve isolée et se dégage au pôle négatif N. Quant aux molécules intermédiaires séparées aussi l'une de l'autre par ces deux mouvements en sens inverse, elles rentrent aussitôt en combinaison. L'hydrogène H_1 de la première molécule se dirigeant vers N rencontre l'oxygène O_2 de la seconde molécule et s'y combine ; H_2 s'unit avec O_3, et ainsi de suite, comme l'indique la figure. Lorsque le courant continue à passer, l'effet se renouvelle, O_2 et H_9 deviennent libres. H_1 est alors réuni à O_3 et ainsi de suite, et nous sommes en droit d'affirmer, comme le faisait Grotthuss, que le phénomène présente une série de décompositions et de recompositions successives (*).

841. Décomposition des sels métalliques. — La décomposition des sels métalliques proprement dits a déjà été donnée dans le § 810, et nous avons vu les produits de la décomposition ne se déposer que sur les deux pôles, exactement comme cela a lieu dans la décomposition de l'eau. Il est clair que l'explication de Grotthuss conviendra dans ce cas comme dans le précédent, il est inutile d'insister sur ce point ; le métal chemine vers le pôle négatif et tous les éléments non métalliques marchent en sens inverse.

(*) L'expérience de la décomposition de l'eau se répète toujours avec de l'eau acidulée par l'acide sulfurique ou tout autre acide, et l'on dit en général que l'acide ne joue pas d'autre rôle que celui de rendre l'eau conductrice. Toutefois, si l'on opère la décomposition dans un appareil divisé en deux compartiments, tel que celui de la figure 356, on trouve que l'acide sulfurique chemine aussi vers le pôle positif. Ainsi ce serait ($SO^3 + O$) et non pas O seulement qu'il faudrait se représenter en mouvement.

Quant à savoir si l'eau pure est décomposable par le courant, voici ce que l'expérience a indiqué. Plus l'eau est purifiée avec soin, plus il est nécessaire d'employer une pile puissante pour obtenir seulement des traces de décomposition, car c'est à peine si le courant passe. Que résulterait-il de l'emploi de l'eau absolument pure ? Y aurait-il encore une décomposition appréciable ? On n'en sait rien.

Par exemple, si l'on décompose le sulfate de cuivre et que l'on représente la constitution d'une molécule de ce sel par la formule chimique (SO^3,CuO);

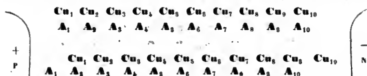


Fig. 355.

Cu va vers l'un des pôles, ($SO^3 + O$) se rend à l'autre pôle. Dans la figure 355 se trouve indiqué ce double mouvement : les lettres A_1, A_2, etc., représentent tous les éléments du sel autres que le métal, et Cu_1, Cu_2, etc., représentent le métal.

842. **Passage du courant à travers plusieurs liquides contigus.** — Un cas intéressant de décomposition est celui qui s'opère dans la pile de Daniell même. Entre le zinc et le cuivre se trouvent de l'eau acidulée et du sulfate de cuivre, séparés par le vase poreux. Le courant intérieur va dans chaque élément du zinc au cuivre, passe donc successivement d'un liquide dans un autre. Que produit-il? Que devient l'hydrogène de l'eau acidulée qui avance vers le cuivre? Que devient l'acide du sulfate de cuivre qui marche en sens inverse? La figure 355 *bis* le montre : KK' représente la cloison poreuse, Z la lame de zinc, C la lame de cuivre; les indices donnent l'ordre des molécules.

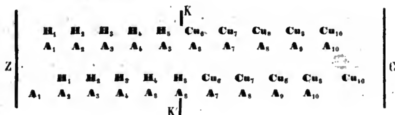


Fig. 355 *bis*.

L'hydrogène H_5 de l'eau acidulée s'unit avec les éléments non métalliques A_6 du sulfate de cuivre.

843. **Décomposition des sels alcalins et terreux.** — La décomposition des sels alcalins ou terreux ne paraît pas donner les mêmes résultats que celle des sels métalliques. Ainsi, quand on décompose le sulfate de potasse par la pile, on trouve au pôle négatif de la potasse (oxyde de potassium), tandis que la décomposition du sulfate de cuivre amène non pas l'oxyde de cuivre, mais bien le cuivre lui-même.

On emploie pour opérer cette décomposition un tube en U (*fig.* 356) dans

lequel se trouve une dissolution concentrée de sulfate de potasse colorée d'avance avec du sirop de violette. Dans chacune des branches du tube, on fait plonger une lame de platine, et l'on met l'une des lames en communication avec le pôle positif P, l'autre avec le pôle négatif N d'une pile. La dissolution placée au pôle positif perd sa couleur violette, elle rougit ; ce qui prouve que l'acide du sel a été rendu libre à ce pôle. La dissolution placée au pôle négatif devient verte : ce qui témoigne de la présence de l'alcali au pôle négatif.

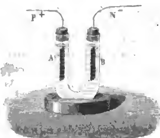


Fig. 356.

844. Interprétation du résultat observé. — L'interprétation la plus directe du phénomène serait que le sulfate de potasse s'est décomposé en acide sulfurique et en potasse, et il semble que l'on devrait résumer l'action du courant sur les différents sels en deux lois distinctes : l'une convenant aux sels alcalins et terreux, l'autre aux sels métalliques proprement dits. Mais il n'en est rien : en réalité, l'oxyde de potassium, qui dans notre expérience est apparu au pôle négatif, n'est produit que par une action secondaire. Le potassium a été amené par le courant à l'état métallique comme le cuivre quand on décompose le sulfate de cuivre, mais aussitôt il a décomposé l'eau de la dissolution, il s'est combiné avec l'oxygène; l'hydrogène s'est dégagé. Une seule et même loi régit la décomposition de tous les sels.

Parmi les expériences qui prouvent que le potassium vient au pôle négatif à l'état métallique, il en est une de M. Pouillet qui consiste à placer à ce pôle une substance qui ait la propriété de s'unir au potassium et de le préserver immédiatement du contact de l'eau. A cet effet le savant physicien emploie le mercure comme pôle négatif.

Son appareil se compose (*fig.* 357) d'un verre percé, à son fond, d'une ouverture qui laisse passer, comme dans le voltamètre, un fil de platine. Ce fil est recouvert complétement d'une couche de mercure versée au fond du verre. Au-dessus du mercure, est une dissolution concentrée de sulfate de potasse. On met le fil de platine en communication avec le pôle négatif N d'une pile; on place dans la dissolution saline une lame de platine qui communique avec le pôle positif. La décomposition du sel a lieu, et l'on trouve après l'expérience que le mercure est chargé de potassium. Ainsi nous pouvons



Fig. 357.

dire maintenant que tous les sels se décomposent, suivant le même mode, par l'influence du courant voltaïque ; le métal se rend au pôle négatif tandis que tous les autres éléments vont au pôle positif. Toutefois, si le courant est un peu faible, l'expérience réussit mal. Au § 849. nous en citerons une nouvelle qui ne laissera aucun doute.

845. **Corps décomposables par le courant.** — Le courant décompose les acides, les oxydes et les sels, en comprenant les sulfures, les chlorures etc., dans la classe des sels. Pour qu'il puisse opérer les décompositions, il faut que les matières décomposables ou *électrolytes* soient ou fondues ou dissoutes. Il n'y a pas d'exception à cette règle. Ainsi l'oxyde de plomb, le sulfure d'argent solides ne sont pas décomposés par le courant, que d'ailleurs ils ne conduisent pas ; mais dès qu'ils sont fondus, ils deviennent conducteurs et décomposables.

846. **Action des différentes parties d'un courant.** — Les différentes parties d'un courant ont une égale puissance pour produire une décomposition chimique. Faraday l'a prouvé, en faisant passer, en même temps, le courant d'une pile à travers l'eau de deux voltamètres disposés l'un à la suite de l'autre. Ainsi que le montre la figure 358, le courant passe de P en N en traversant d'abord le voltamètre V′, puis le voltamètre V, et l'on voit alors que, dans l'un comme dans l'autre, la même quantité de gaz se dégage. Cela est vrai quelle que soit la distance, quelle que soit la largeur des lames de platine de V et de V′. Les deux lames du voltamètre peuvent être très-rapprochées l'une de l'autre, tandis que les lames de V′ sont très-éloignées, la loi se maintient toujours.

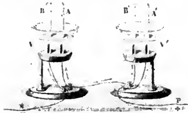


Fig. 358.

Si l'on met de même deux appareils à sulfate de cuivre l'un à la suite de l'autre, dans chaque appareil le même poids de cuivre se dépose au pôle négatif.

847. **Équivalents électro-chimiques.** — Faraday eut l'idée de rechercher ce qui arriverait, si, au lieu d'une série de voltamètres, il plaçait, les uns à la suite des autres, plusieurs appareils contenant, l'un de l'eau acidulée, les autres des sels fondus et anhydres.

La figure 359 représente cette expérience : V est un voltamètre ; T, un tube chauffé par une lampe qui maintient en fusion du chlorure d'étain. Le courant de la pile pénètre dans le chlorure par un fil de platine, sort par un nouveau fil de platine, plongé, lui aussi, dans la matière en fusion, et enfin se rend au voltamètre qu'il traverse. Après que le courant a circulé, le poids d'hydrogène dégagé dans le voltamètre et celui d'étain déposé sur

le fil négatif du tube sont dans le rapport de leurs équivalents chimiques. Pour un équivalent d'hydrogène, un équivalent d'étain est mis en liberté.

Faraday a conclu, à la suite de plusieurs autres expériences du même genre, que la loi était générale, et il a nommé *équivalents électro chimiques* des corps, les poids ainsi obtenus; l'expression est heureuse, car elle donne l'énoncé même de la loi.

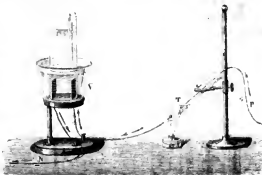


Fig. 859.

848. **Généralisation de la loi de Faraday.** — Les vérifications de la loi de Faraday ont été nombreuses. M. Matteucci, M. Buff et M. Soret, chacun de son côté, chacun avec des sels différents, soumis à la décomposition dans des circonstances variées, ont confirmé par des expériences bien conduites cette belle loi des équivalents électro-chimiques qui a montré, une fois de plus, les rapports intimes qui existent entre les phénomènes chimiques et les phénomènes électriques. Mais une question, pleine d'intérêt et dont la solution était difficile à prévoir, s'est posée de suite : celle de savoir comment la loi s'appliquerait à deux sels formés tous les deux par le même métal, mais à des degrés d'oxydation différents. Ainsi, deux appareils à décomposition placés à la suite l'un de l'autre sont traversés par le même courant ; l'un renferme du protochlorure de cuivre (Cu^2Cl), l'autre du bichlorure (CuCl). Quel est le poids de cuivre qui se déposera sous l'influence du même courant sur l'électrode négative de chaque appareil ? L'expérience a prouvé que ces poids étaient inégaux, mais la loi que l'on cherchait a été rendue manifeste lorsque M. Buff, en décomposant, par un même courant, les deux chlorures de cuivre Cu^2Cl et CuCl fondus et anhydres, comme dans l'expérience de Faraday, a trouvé que le chlore se dégageait, en égale quantité, aux deux électrodes positives.

D'après cela, si l'on convient de représenter toujours l'équivalent d'un sel par une formule qui contienne un équivalent de l'acide ou du métalloïde jouant le rôle de l'acide, l'énoncé qui convient le mieux à la loi de Faraday est celui-ci : Un même courant, qui traverse plusieurs sels, décompose des poids équivalents de ces sels.

849. **Application de la loi de Faraday.** — Cette loi a été appliquée très-heureusement par Daniell pour résoudre une question qui nous a em-

barrassés déjà (844) : celle de la décomposition des sels alcalins et terreux. Aidé de la loi nouvelle que nous venons de formuler, Daniell a démontré, sans qu'il soit possible d'en douter, que la décomposition de tous les sels s'opère suivant le même mode : c'est toujours le métal et *jamais* l'oxyde qui vient se déposer sur l'électrode négative. A cet effet, il conduit le même courant *faible* ou *fort* à travers un voltamètre à eau acidulée et à travers un tube en U contenant une dissolution de sulfate de soude. Il recueille les volumes de gaz, qui se dégagent de chaque appareil par le passage du courant, et trouve que ces volumes ramenés aux mêmes conditions de température et de pression sont identiquement les mêmes. Ainsi, quand un équivalent d'hydrogène s'est rendu dans l'éprouvette du voltamètre, un équivalent d'hydrogène est venu aussi se dégager dans l'éprouvette qui reçoit le gaz provenant de la branche négative du tube en U. Mais, en même temps, dans ce tube en U, un autre phénomène chimique s'est accompli : un équivalent de soude libre se trouve dans la branche négative, et un équivalent d'acide sulfurique libre dans la branche positive. En résumé, on voit donc que dans le tube à sulfate de soude, 1° des gaz se dégagent comme si un équivalent d'eau avait été décomposé ; 2° de la soude et de l'acide sulfurique libre apparaissent comme si un équivalent de sulfate de soude s'était décomposé : dans le voltamètre, au contraire, la décomposition d'un équivalent d'eau a seule eu lieu. Mais la loi des équivalents électro-chimiques enseigne qu'un courant, produisant une décomposition en un point, ne peut pas en produire une double en un autre point de son trajet. Les deux effets observés dans le tube en U ne peuvent donc pas être des effets directs du courant; et l'expérience ne comporte pas d'autre interprétation que celle que nous avons donnée plus haut : Le sel s'est décomposé en sodium (Na) d'une part, et en acide sulfurique et oxygène ($SO^3 + O$) de l'autre; l'hydrogène qui se dégage et la soude qui apparait sont les produits de la réaction ultérieure du sodium libre sur l'eau au sein de laquelle ce métal est arrivé.

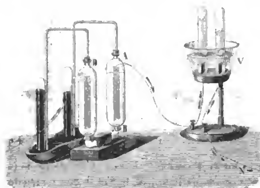


Fig. 360.

850. Extension de la loi de Faraday aux actions produites à l'inté-

rieur de la pile. — A l'intérieur de la pile s'opèrent aussi des phénomènes de décomposition chimique ; quelle relation de grandeur présentent-ils avec ceux qui se manifestent à l'extérieur ? Cette relation est exprimée par la loi des équivalents électro-chimiques elle-même. Les expériences de Daniell mettent ce fait hors de doute. Ce physicien construisit une pile avec des lames de zinc et de platine disposées comme les lames d'un voltamètre et plongeant dans l'eau acidulée (*fig.* 361) ; si bien qu'au-dessus du platine on pouvait placer une cloche ; dans le circuit de cette pile fut introduit un voltamètre véritable. A mesure que le courant circulait, un dégagement de gaz avait lieu et, dans chaque éprouvette à hydrogène, le volume de gaz était le même soit que l'on considérât un des éléments de la pile, soit que l'on considérât le voltamètre extérieur.

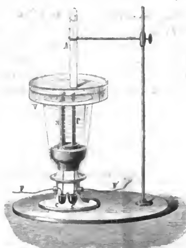


Fig. 361.

Au lieu de décomposer l'eau par le passage du courant extérieur, donne-t-on un sel à traverser, du sulfate de zinc par exemple, et pèse-t-on chacune des lames de zinc de la pile ? on trouve que pour un équivalent de zinc déposé à l'électrode négative, qui plonge dans le sulfate de zinc, on trouve, dis-je, que *chacune* des lames de zinc de la pile a perdu un équivalent de métal. Le poids du métal, consommé dans un des éléments de la pile, se régénère donc à l'extérieur. Mais il ne faut pas s'y tromper, la régénération extérieure ne compense nullement la perte intérieure ; car si une pile compte cinq éléments, par exemple, la consommation du zinc s'effectue à la fois dans chacun des cinq éléments, et la reproduction n'a lieu que dans un seul appareil.

851. **Chaleur dégagée à l'intérieur de la pile. — M. Joule.** — Les relations entre les actions intérieures et extérieures de la pile, si nettement établies par Faraday et par Daniell, ne sont pas les seules. D'autres rapports ont été découverts auxquels on a été conduit par l'étude des mêmes phénomènes faite à un point de vue différent de celui qui avait occupé les précédents observateurs. M. Joule a trouvé les liens qui unissent deux parties de la physique jusqu'ici tout à fait distinctes : la chaleur et l'électricité. Il a montré que la puissance de la pile voltaïque est dans un rapport intime avec la chaleur engendrée dans les réactions chimiques qui se

produisent, et que tout un ordre de questions relatives aux courants, pouvait être traité comme des problèmes de calorimétrie. Cependant, quoique M. Joule ait trouvé la dépendance des deux classes de phénomènes, ses expériences manquaient de l'exactitude qui entraîne la conviction : c'est à M. Favre qu'on doit les déterminations précises que nous allons faire connaître.

852. **Expériences de M. Favre.** — Quelle est la quantité de chaleur qui se produit par les réactions intérieures de la pile? M. Favre l'obtient en enfermant la pile avec ses pôles dans la moufle M du calorimètre à mercure (*fig.* 362) qui a été décrit (488). Quand les pôles sont unis, le zinc se dissout en devenant sulfate de zinc; la température du calorimètre s'élève, et l'élévation de température indique la quantité de chaleur produite. C'est



Fig. 362.

en nombre rond 18 unités de chaleur par équivalent de zinc dissous (*).

Si le fil qui unit les deux pôles est gros et court, et que dès lors il ne s'échauffe pas par le courant, on peut le faire sortir ou le laisser tout entier à l'intérieur de la moufle : les indications du calorimètre ne sont pas pour cela différentes. Mais si l'on réunit les deux pôles de la pile par un fil très-fin qui s'échauffe, il en est tout autrement : quand le fil est à l'extérieur de la moufle, la quantité de chaleur donnée au calorimètre par la dissolution d'un équivalent de zinc n'est plus égale à 18 calories; elle a baissé considérablement. Qu'est devenue la chaleur qui semble perdue ? Elle se retrouve entièrement dans le fil. On le reconnaît en reprenant l'expérience et en ayant soin de tenir la pile et le fil à la fois dans la moufle de l'instrument : les 18 calories se retrouvent intégralement.

(*) Nous conviendrons de représenter l'équivalent de l'hydrogène H par 1gr, alors celui du zinc Zn sera 33gr, et, ainsi que nous l'avons indiqué dans le chapitre de la calorimétrie, l'unité de chaleur sera toujours pour nous la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de 1 kilogramme d'eau.

Que conclure de là ? C'est que la chaleur, qui se développe lorsque le courant traverse un fil de petit diamètre, n'est autre qu'une portion de la chaleur engendrée par la dissolution du zinc qui s'est converti en sulfate : cette chaleur est déplacée par l'arrangement particulier que Volta a découvert, elle vient échauffer le fil, et à ce point de vue la pile peut être considérée comme un appareil qui transporte à des points particuliers du circuit la chaleur engendrée dans les réactions chimiques.

853. **Extension des principes précédents au cas des décompositions chimiques.** — Ce résultat peut être généralisé, et l'on est conduit à admettre que la chaleur, développée par le courant en un point quelconque du circuit, est empruntée aux réactions chimiques qui s'exercent dans la pile. Ainsi le courant passe-t-il à travers un voltamètre ? L'eau est décomposée ; mais elle ne peut l'être qu'en absorbant de la chaleur, et des expériences directes de calorimétrie démontrent que chaque équivalent d'eau exige pour sa décomposition 34 unités de chaleur. Dans le cas, qui nous occupe, cette chaleur est évidemment fournie par les actions chimiques intérieures de l'appareil voltaïque, et l'on peut dire que la quantité de chaleur développée par la dissolution du zinc est, sous forme d'électricité, employée à la décomposition de l'eau.

854. **Application des lois précédentes.** — Ces expériences, combinées avec celles de Daniell (850), éclairent d'une vive lumière bien des questions restées jusque-là tout à fait obscures. En voici un exemple : Pendant longtemps on a cherché à décomposer l'eau avec un seul élément, dont les métaux étaient le zinc et le cuivre, et le liquide était l'eau acidulée par l'acide sulfurique ; on n'a pas réussi. Aujourd'hui on peut affirmer qu'on ne réussira jamais. En effet, d'après les expériences de Daniell (850), si un équivalent d'eau se décompose en dehors de la pile, il ne peut pas se dissoudre plus d'un équivalent de zinc dans chaque élément. Mais d'un côté la dissolution d'un équivalent de zinc produit 18 unités de chaleur, de l'autre la décomposition d'un équivalent d'eau en exigerait 34 ; donc un seul élément ne peut pas fournir la quantité de chaleur nécessaire à la décomposition de l'eau ; jamais il ne produira cette décomposition. Mais que l'on emploie deux éléments au lieu d'un seul : si un équivalent de zinc se dissout dans chacun d'eux, deux fois 18 calories seront dégagées, et ces 36 unités de chaleur pourront fournir les 34 calories indispensables pour que les éléments de l'eau se séparent.

D'où vient cependant qu'un seul élément de Bunsen suffise à la décomposition de l'eau ? C'est que l'hydrogène, qui se dégage sur le charbon par suite de la décomposition de l'eau, à l'intérieur de la pile elle-même, se combine avec une partie de l'oxygène de l'acide azotique ; et par cette combinaison 34 unités de chaleur s'ajoutent aux 18 que donne la dissolution de l'équivalent de zinc : total, 52. De ces 52 calories, il faut toutefois

en retrancher 7, qui sont absorbées par la décomposition chimique de l'acide azotique produite par l'hydrogène; il reste encore 45 calories, plus que suffisantes pour en fournir 34 nécessaires à un équivalent d'eau qui se décompose.

Ainsi se trouvent réduites à des calculs de calorimétrie les questions qui concernent la pile ; ainsi se trouvent rattachées l'une à l'autre deux branches de la physique dont la liaison intime avait échappé aux observateurs qui ne faisaient qu'une étude individuelle des deux ordres de phénomènes.

855. **Origine chimique de l'électricité voltaïque.** — Arrivés au point où nous sommes, il est impossible de ne pas remarquer que la puissance de la pile s'exerçant aux dépens des actions chimiques intérieures, la théorie de Volta ne peut être acceptée. On ne peut plus admettre que ce soit le contact des métaux qui produise les électricités mises en jeu. Déjà depuis longtemps M. Faraday et M. de la Rive avaient montré qu'un assemblage métallique, s'il constitue une source d'électricité, ne peut être qu'une source insignifiante. Déjà ils avaient fait voir (805 *bis*) que le sens du courant dépendait de la réaction chimique qui s'opérait ; et ils en avaient conclu que la force électro-motrice avait son origine aux points où le liquide attaque le métal. Les nouvelles expériences citées plus haut arrivent comme preuves nouvelles à l'appui de cette théorie électro-chimique de la pile.

Du reste, la grande idée de Volta subsiste toujours. L'illustre physicien a prévu les effets puissants qui devaient résulter de l'association d'un grand nombre d'éléments mis en série : là est son œuvre. Par la théorie nouvelle, la force électro-motrice se trouve déplacée quant à son origine ; mais ce déplacement admis, les raisonnements de Volta restent vrais.

856. **Effets chimiques de la pile et de la machine électrique.** — En parlant de la pile de Volta (802), nous avons dit qu'elle pouvait servir à produire tous les phénomènes que l'on obtient avec l'électricité de frottement, et nous l'avons démontré. Peut-on dire inversement que tous les phénomènes, observés avec le courant de la pile, seraient reproduits à leur tour avec le courant qu'engendrerait l'électricité fournie par la machine électrique? La réponse à une pareille question ne paraît pas douteuse : évidemment, d'après ce qui précède, la pile est un appareil producteur d'électricité essentiellement distinct des machines électriques par son principe; mais le mode de production seul diffère, les électricités sont les mêmes. Toutefois il est un phénomène que pendant longtemps on n'a pas su obtenir avec les machines ordinaires : ce sont les décompositions chimiques telles que la pile les opère, décompositions où les éléments qui deviennent libres sont séparés à chacun des pôles. Wollaston fit dans cette voie des tentatives infructueuses : en faisant passer des étincelles électriques à travers l'eau, il réalisa, il est vrai, la séparation de l'hydrogène et de l'oxygène, mais ces gaz se dégageaient sur tout le trajet de l'étincelle : il n'y avait donc pas là un phéno-

mène de décomposition voltaïque. Cet insuccès, et d'autres encore, ont mis dans beaucoup d'esprits cette fausse idée : qu'une différence d'action résultait, soit du mode de production, soit même d'une qualité différente des électricités développées avec les deux appareils. En réalité, la différence tient à la manière dont les expériences ont été exécutées. Avec la pile, on ne fait pas jaillir l'étincelle dans l'intérieur du liquide à décomposer; avec la machine électrique, il faudra donc, si l'on veut obtenir les mêmes résultats, se placer dans des conditions d'expérience identiques et éviter les étincelles qui, ainsi qu'il est prouvé aujourd'hui, décomposent l'eau parce qu'elles élèvent la température des parties qu'elles traversent.

856 *bis*. **Décompositions chimiques produites avec la machine électrique.** — Faraday a parfaitement compris que la manière d'opérer devait être modifiée dans ce sens, et c'est dans ce but qu'il disposa l'expérience qui se trouve représentée ici (*fig*. 363). Un papier de tournesol A, imbibé d'une dissolution de sulfate neutre de soude, est mis en rapport par des fils de platine F, F' : d'une part avec une machine électrique, d'autre part avec le sol. A cet effet, les deux fils métalliques reposent sur des lames d'étain B, B qui communiquent l'une par le fil P avec la machine, et l'autre par le fil N à la terre. Si l'on fait tourner le plateau de la machine électrique, deux courants d'électricité ont lieu comme sur le fil interpolaire d'une pile : un courant d'électricité positive va de la machine vers le sol, un courant d'électricité négative marche en sens inverse. D'ailleurs, aucune étincelle ne jaillira entre les deux fils de platine, car la machine mise en communication avec la terre ne peut pas se charger fortement. Dès lors, le courant circulera à travers le sel dissous, corps conducteur dont le papier est imbibé, comme le fait le courant d'une pile qui traverse une dissolution saline. Dans ces conditions nouvelles indiquées par la théorie, l'expérience réussit parfaitement. Si le papier est bleu, une tache rouge se forme du côté de la machine; s'il est rougi à l'avance par un acide, une tache bleue apparaît dans le voisinage de l'extrémité du fil qui aboutit au sol : s'il est moitié rouge, moitié bleu et que les portions ainsi colorées soient convenablement placées, les deux effets se montrent à la fois.



Fig. 363.

APPLICATIONS CHIMIQUES DE LA PILE.

La faculté, que la pile possède d'opérer la décomposition de l'eau et des sels, a été utilisée soit en chimie, soit dans l'industrie.

857. **Découverte du potassium.** — Le premier résultat important, qui ait été obtenu dans cette direction, est dû à Davy. En 1807, Davy soumit à l'action d'une pile puissante la potasse, qui jusqu'alors n'avait été décomposée par aucun des agents connus; et il vit briller au pôle négatif un métal qui brûlait au contact de l'air : c'était le potassium. Le potassium mis en liberté par le courant peut être soustrait à l'action de l'air au moment de sa production, et il se conserve alors à l'état métallique. Dans ce but, on creuse dans un fragment de potasse humide une cavité que l'on remplit de mercure (*fig.* 364). On place le fragment sur une lame de platine, mise en communication avec le pôle positif d'une pile puissante, dont le pôle négatif plonge dans le mercure. Si la pile est très-énergique (40 à 50 grands éléments de Bunsen), le mercure ne tarde pas à épaissir et même à se solidifier. L'amalgame solide ainsi formé étant soumis à la distillation suivant les procédés que la chimie enseigne, on en extrait le potassium métallique.

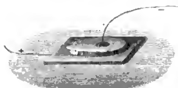


Fig. 364.

858. **Préparation des métaux terreux.** — M. Bunsen, dans ces derniers temps, s'est servi de la pile pour la préparation de métaux terreux que les actions chimiques employées jusqu'ici ne parviennent pas à donner dans un état satisfaisant de pureté. Le magnésium est dans ce cas. M. Bunsen emploie le chlorure de magnésium amené à l'état de fusion par une température élevée. Des tiges P, N (*fig.* 365), faites avec le charbon des cornues plongées dans le creuset où la fusion s'opère et fixées au couvercle, sont mises en communication avec les pôles de la pile. Le métal du chlorure décomposé vient au pôle négatif, tandis que le chlore se dégage au pôle positif. Ce chlore au sein de la matière fondue attaquerait le métal devenu libre, si l'on ne prenait pas quelques dispositions protectrices. Le diaphragme L, L' de porcelaine sépare la partie supérieure du creuset en deux compartiments, empêche le gaz de venir toucher le pôle négatif et préserve le métal qui s'y trouve. Mais il est encore un inconvénient à éviter : le magnésium, plus léger que la matière fondue, remonte à la surface et vient brûler dans l'air. Il faut le retenir par quelque obstacle; M. Bunsen y réussit d'une manière ingénieuse, en adoptant la disposition que la figure indique : les dents de la lame N dirigées obliquement de bas en haut empêchent

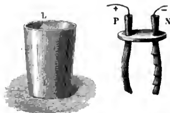


Fig. 365.

l'ascension du métal déposé, en le retenant contre leurs faces inférieures.

Par un procédé analogue, l'aluminium, le lithium, le calcium, le strontium ont été isolés à l'état de pureté, ces trois derniers par M. Matthiessen.

859. **Préparation du chrôme et du manganèse.** — Le chrôme et le manganèse, métaux très-oxydables au contact de l'eau, ont pu cependant être obtenus au sein d'une dissolution aqueuse de leur chlorure. L'artifice, employé par M. Bunsen, consiste à prendre, comme pôle négatif, un fil très-fin et comme pôle positif un conducteur d'une surface considérable, et à se servir en outre d'une pile très-puissante. Le métal se dépose avec une telle rapidité que les couches successives sont abritées de l'action de l'eau par les couches nouvelles qui se superposent aux premières, et presque tout le dépôt est ainsi préservé de l'action oxydante qu'il fallait éviter.

860. Les applications, que nous venons de faire connaître, sont purement scientifiques, elles ne sont pas encore pratiquées en dehors du laboratoire. Nous devons maintenant entrer dans quelques détails sur des industries nouvelles, dont le développement est déjà considérable, et qui ont leur origine dans les travaux exposés dans ce chapitre. C'est un des beaux exemples, non le plus beau, du concours désintéressé que la science, en poursuivant son but, apporte nécessairement aux arts utiles. Aussi ne craindrons-nous pas de parler un peu longuement de ces industries; elles rentrent complétement dans notre sujet.

Leur objet commun est la formation, au moyen de la pile, de dépôts métalliques cohérents: ce sont la dorure, l'argenture, la galvanoplastie.

861. **Dorure. Principe de la méthode.**— Les procédés, employés autrefois pour recouvrir une surface métallique d'une mince couche d'or, d'argent ou de tout autre métal, compromettaient promptement la santé des ouvriers. Un amalgame d'or et de mercure était appliqué sur la pièce à dorer. Par une élévation convenable de température, le mercure était chassé à l'état de vapeur, tandis que l'or, restant déposé sur la pièce à recouvrir, y formait une couche d'un aspect mat, à laquelle le brunissoir donnait l'éclat du poli.

Le danger de cette méthode a sa cause dans la production des vapeurs mercurielles, que l'ouvrier respire sans cesse, et qui amènent d'affreuses maladies. Aussi, dès que la pile fut découverte et que l'on eut reconnu son action sur les dissolutions salines, des essais furent tentés pour dorer les métaux par la décomposition voltaïque d'un sel d'or, en disposant la pièce à dorer comme électrode négative pour l'établissement du courant. Par malheur, pendant longtemps on n'obtint qu'une lame d'or mince, irrégulière, peu compacte, peu adhérente, et la dorure au mercure resta forcément en usage.

862. **Conditions de succès.** — Le peu de succès de la dorure galvanique était dû : 1° aux piles qui ne fournissaient pas un courant constant,

2° à la nature des dissolutions employées qui, au moment de leur décomposition par le courant, donnaient naissance à des corps capables d'altérer le métal immergé dans la liqueur.

En 1840, Daniell découvrit la pile qui porte son nom, et l'on eut dès lors un courant constant dont l'industrie put tirer parti. Ce courant, réglé avec la puissance convenable pour la meilleure exécution du travail, conservait longtemps la force exigée. Enfin, dès 1841, M. Elkington d'une part, et M. Ruolz d'une autre, sont parvenus à trouver des dissolutions qui fournissent un dépôt ne laissant rien à désirer. Ils en ont même indiqué un très-grand nombre jouissant de cette propriété ; celle que l'on préfère est une dissolution de cyanure d'or dans le cyanure de potassium, qui présente l'avantage d'être constamment alcaline, et de fournir par sa décomposition un gaz, le cyanogène, dont l'action corrosive sur les métaux est nulle.

Voici la formule d'une liqueur avec laquelle la dorure réussit très-bien : On fait dissoudre dans 100 grammes d'eau 1 gramme de chlorure d'or, 10 grammes de prussiate jaune de potasse et 5 grammes de carbonate de potasse. On fait bouillir en ajoutant de temps en temps de l'eau pure pour entretenir le sel au même degré de dilution ; on filtre, et la liqueur est bonne à employer.

863. **Pratique de la dorure.** — Avant d'immerger dans la dissolution la pièce à dorer, on la décape avec soin. Est-elle fortement salie à sa surface par un dépôt de matières organiques ou par l'oxydation? on la fait rougir au feu et on la plonge, encore chaude, dans un mélange d'acides qui mettent à nu le métal sous-jacent. La surface est-elle à peu près nette ? on la nettoie avec l'alcool et l'eau, et on l'imprègne avec une brosse douce de crème de tartre en poudre formant une pâte avec l'eau. Après le décapage, le métal à dorer est lavé à l'eau distillée, attaché au pôle négatif A (*fig.* 366) de la pile et plongé alors dans le bain d'or, où se dispose une lame d'or P fixée au pôle positif B. Le courant passe ; la dorure s'opère, et en même temps le cyanogène qui vient au pôle positif dissout, sous l'influence du courant, la lame d'or qui s'y trouve : la solution se maintient alors dans un état sensiblement constant. Quand on juge la couche déposée assez épaisse, on arrête l'opération, et quelques coups de brunissoir donnent à la surface le poli ordinaire.

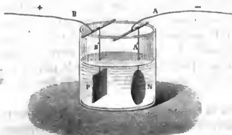


Fig. 366.

Par cette méthode, on peut dorer le platine, l'argent, le cuivre, le laiton,

le bronze et même l'acier et le fer. En élevant la température du bain qui sert à la dorure, la couche d'or déposée croît plus rapidement d'épaisseur.

864. **Argenture.** — L'argenture s'exécute par le même procédé que la dorure. La liqueur, que l'on emploie, se compose de 1 gramme de cyanure d'argent sec dissous dans 100 grammes d'eau, qui contiennent déjà 10 grammes de cyanure simple de potassium.

865. **Galvanoplastie. Son but.** — Au moyen de la pile, on peut aussi reproduire les médailles, les bas-reliefs, les planches gravées, les statues ou tout autre objet, quelque délicats qu'en soient les détails. Tel est le but de cette industrie, qui a pris de nos jours un grand développement, et qu'on nomme *galvanoplastie*.

Dans cette industrie, c'est le courant voltaïque qui dépose molécule à molécule une couche de cuivre sur le moule de l'objet en question. La reproduction exigera donc deux sortes d'opérations : 1° Il faudra obtenir un moule qui soit à sa surface bon conducteur de l'électricité, et 2° il faudra faire déposer le cuivre dans des conditions telles, que la lame cohérente puisse aisément être séparée de la surface sur laquelle elle se dépose.

866. **Moulage.** — Pour obtenir le moule de l'objet à reproduire, on se sert de la stéarine, du plâtre, de l'alliage fusible de Darcet, et mieux encore de la gélatine ou de la gutta-percha. Ces différentes substances sont fondues ou converties en une pâte molle, chacune selon sa nature, puis elles sont mises en rapport avec l'objet dont elles doivent prendre l'empreinte. Afin que le moule formé puisse se détacher facilement, l'on recouvre la surface à mouler d'une couche sans épaisseur sensible de quelque matière pulvérulente ou liquide.

Veut-on obtenir un moule avec de l'alliage de Darcet? Cet alliage est fondu dans un vase quelconque, par exemple dans une cuiller hémisphérique de fer. On le laisse refroidir, et quand on juge que la solidification est prochaine, la médaille enduite d'un corps gras est appliquée sur la surface du bain. L'alliage devenant solide reproduit et conserve tous les détails du modèle. Emploie-t-on la gutta percha? on la ramollit sous l'influence d'une température peu élevée et on la presse fortement contre l'objet recouvert de plombagine en poudre impalpable, elle se moule exactement, et quand elle est durcie par le refroidissement, elle se détache sans difficulté. Cette dernière substance offre un avantage précieux qui résulte de son élasticité. Elle peut être séparée des statuettes, des bas-reliefs bien qu'elle enveloppe presque complétement certaines parties saillantes. Dans de pareilles circonstances, le moule de métal ou de stéarine se briserait infailliblement; la gutta percha plie, s'infléchit, et aussitôt qu'elle est enlevée, elle reprend la forme du modèle. Enfin, des moules s'obtiennent par la galvanoplastie elle-même, comme on le comprendra aisément par ce qui suit.

867. **Préparation du moule obtenu.** — Le moule obtenu doit être conducteur de l'électricité. Pour le rendre tel, quand il ne l'est pas par lui-même, on recouvre sa surface de plombagine. A cet effet, on se sert d'une brosse douce que l'on plonge dans de la plombagine en poudre très-fine. Par le frottement suffisamment répété, une poussière impalpable reste adhérente et forme un enduit conducteur tellement mince que les traits les plus fins ne sont pas altérés. Il est clair d'ailleurs que la surface destinée à recevoir le cuivre doit seule être ainsi recouverte. Lorsque le moule au contraire est formé par une substance conduisant bien l'électricité, telle que l'alliage de Darcet, on vernit à la cire toutes les parties qui ne doivent pas se recouvrir d'un dépôt métallique ; quant aux autres parties, elles sont enduites d'une couche de plombagine, afin d'empêcher le métal déposé par la pile de former avec le moule un tout inséparable.

868. **Formation du dépôt.** — Le moule, préparé par l'une des méthodes indiquées plus haut, est plongé dans une dissolution de sulfate de cuivre et mis en communication avec le pôle négatif d'une pile. Dans la même dissolution plonge une lame de cuivre qui communique avec le pôle positif. Le courant passe; le dépôt de cuivre s'opère, et, au bout de deux ou plusieurs jours, selon l'épaisseur qu'on veut obtenir, cette couche est détachée : le modèle est reproduit. La lame de cuivre placée au pôle positif joue dans cette opération le même rôle que la lame d'or employée dans le cas de la dorure. L'acide sulfurique et l'oxygène se dégageant au pôle positif, régénèrent avec le cuivre, qu'ils attaquent, le sulfate de cuivre décomposé : ce qui maintient la dissolution dans son état primitif.

869. **Courant à employer.** — Pour la réussite d'une opération galvanoplastique, il importe que le dépôt métallique augmente avec lenteur ; aussi le courant doit-il être réglé en conséquence. Lorsqu'on opère avec des courants tels que le dépôt croît rapidement d'épaisseur, le métal obtenu manque de cohérence, se brise ou s'écrase sous le moindre effort et même le métal déposé peut n'être qu'une poussière. D'autre part, si l'accroissement d'épaisseur de la lame de cuivre marche trop lentement, le dépôt tend à devenir cristallin.

En général, la pile, que l'on emploie, est formée d'un ou deux éléments dont la surface est d'autant plus étendue que les dimensions de la pièce à reproduire sont plus grandes. A la Carte de France par exemple, où les planches gravées sont reproduites par la galvanoplastie, on se sert de piles de Smee de plusieurs décimètres carrés de surface. Le plus souvent on emploie une pile de Daniell, dont le zinc est plongé dans de l'eau faiblement acidulée; les éléments se prennent d'ailleurs de dimensions différentes selon la grandeur de la surface à recouvrir de métal.

870. **Appareil simple.** — Dans l'industrie, on procède avec plus d'économie. On utilise le dépôt même, qui se forme sur le cuivre de la pile de

Daniell. Cette pile est disposée dans des conditions telles que le moule reçoive le dépôt métallique produit normalement dans chaque élément de l'appareil voltaïque, et pour cela, on le substitue à la lame de cuivre, qui plonge d'habitude dans la dissolution de sulfate de cuivre nécessaire pour que la pile soit en activité. Ainsi, l'appareil galvanoplastique se compose, dans ce cas, d'un vase poreux placé à l'intérieur d'un vase de terre, de grès ou de toute autre matière non conductrice. Ce vase poreux sépare deux liquides : l'un formé par une dissolution de sulfate de cuivre et l'autre par de l'eau acidulée avec l'acide sulfurique. Le premier est à l'extérieur du vase ; le second à l'intérieur. Dans l'eau acidulée plonge une lame de zinc, et dans le sulfate de cuivre est disposé le moule à recouvrir de métal. En réunissant le zinc et le moule par un conducteur métallique, on complète le circuit de l'élément de Daniell : la pile est en activité, et le cuivre se dépose.

871. **Cuve de galvanoplastie.** — L'appareil que représente la figure 367 est construit dans ces conditions et dans des proportions telles que l'on puisse obtenir un assez grand nombre d'épreuves à la fois. Comme on le voit, c'est une auge de bois revêtue intérieurement de gutta-percha. L'auge contient une dissolution de sulfate de cuivre saturée et des vases poreux renfermant eux-mêmes l'eau acidulée et le zinc. Par les pinces C, les lames de zinc sont toutes mises en communication avec une tringle NN'; les moules sont suspendus à deux autres tringles PP' et $P_1P'_1$; des conducteurs métalliques réunissent ces tringles. Les moules M se recouvrent de cuivre métallique ; et à mesure que la dissolution s'appauvrit, le sulfate de cuivre, contenu dans de petits sacs suspendus dans le liquide, se dissout et remplace le sel qui a disparu.

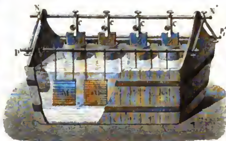


Fig. 367.

872. **Résultats obtenus.** — La galvanoplastie n'est pas restée longtemps confinée dans les laboratoires : l'industrie s'est emparée de la découverte scientifique et l'a appropriée à ses besoins. Les bronzes d'art, dont la reproduction par les procédés anciens était limitée et difficile, s'obtiennent maintenant avec une facilité merveilleuse ; bientôt leur prix sera abordable aux plus modestes fortunes. Autrefois, lorsqu'un graveur avait passé dix années de sa vie à interpréter le tableau d'un grand maître, son œuvre ne pouvait se tirer qu'à un petit nombre d'exemplaires. Dès que deux mille épreuves étaient sorties des presses, la planche se trouvait hors de service ; les pressions violentes que l'ouvrier est obligé d'exercer sur la

planche de cuivre pour étendre l'encre, et pour nettoyer la surface, avaient usé le cuivre, au point qu'il n'était plus possible d'obtenir de bonnes épreuves. Aujourd'hui, grâce à la galvanoplastie, une planche gravée se multiplie aussi souvent que l'on veut. Par exemple, à la Carte de France, on ne manque pas, toutes les fois qu'une planche nouvelle sort des mains du graveur, de l'employer immédiatement à la reproduction de plusieurs planches semblables. La finesse des traits des nouvelles planches obtenues par la galvanoplastie ne le cède en rien à celle que présentent les traits du modèle. Toutes les industries analogues procèdent de la même façon. Par exemple, la gravure sur bois s'obtient, comme son nom l'indique, au moyen d'une planche de buis, sur laquelle sont faites des entailles convenables ; mais le buis ne tarde pas à s'écraser en passant sous les presses de l'imprimerie, et, après un tirage de quelques milliers d'exemplaires, les traits les plus fins sont effacés et toute la beauté du dessin disparaît. Aussi reproduit-on par la galvanoplastie le travail du graveur ; on obtient ce que l'on appelle des clichés et on n'emploie plus les bois pour imprimer, ils ne servent que pour obtenir de nouveaux clichés quand les premiers sont usés. Cette méthode a été précisément suivie pour l'impression des gravures que contient ce livre. A l'imprimerie, dans un atelier spécial, les bois ont été reproduits par la galvanoplastie, et ce sont ces épreuves galvanoplastiques qui ont servi à tirer toutes les gravures insérées dans le texte. C'est la cuve même où la reproduction s'est faite qui se trouve représentée dans la figure 367. Nous devons à l'obligeance de notre imprimeur le dessin que nous en avons donné.

Du reste, pour donner un exemple de la valeur du procédé, nous faisons ici insérer, deux fois, dans le texte le portrait de Volta. L'une des gravures (*fig.* 368) est imprimée avec le bois entaillé par l'ouvrier, la seconde (*fig.* 369) avec le cliché. En donnant un pareil exemple nous n'avons qu'une crainte :



Fig. 368.



Fig. 369.

pendant le tirage, le bois s'écrasera un peu, et, sur les derniers exemplaires que l'on obtiendra, il ne produira pas d'aussi beaux effets que le cliché.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

873. **Premières actions connues.** — L'expérience de Galvani est la première où l'on ait observé l'action de l'électricité de la pile sur les animaux. Dans cette expérience, en effet, l'arc métallique zinc et cuivre, en contact avec les liquides qui lubrifient les muscles et les nerfs forme, en réalité, un couple voltaïque, qui représente la cause non pas unique, mais du moins la cause principale des mouvements de la grenouille. L'effet manifesté se produit, du reste, sur les animaux de toute taille. L'expérimentateur qui saisit les pôles d'une pile, chacun avec une main différente, reçoit une commotion et tressaille d'un mouvement involontaire, quand ses mains sont mouillées par un liquide conducteur et que les éléments sont nombreux. Les éléments, d'ailleurs, doivent être disposés en série l'un à la suite de l'autre, pour produire des secousses chez un animal de forte taille; s'ils sont peu nombreux, ils ne déterminent aucune commotion, quand même leur surface serait très-considérable. Nous expliquerons bientôt la raison de cette différence dans le mode d'action des deux sortes de piles.

874. Ces commotions sont des phénomènes complexes; le courant traverse à la fois les nerfs, les muscles, les os, les liquides soumis à son action. Les physiologistes n'ont pu se contenter de la connaissance d'un résultat si mal déterminé; ils se sont livrés à des études spéciales pour reconnaître le rôle que joue chaque élément de l'organisme dans ce phénomène.

875. **Action sur le nerf.** — Une grenouille, préparée selon le procédé de Galvani (*fig.* 370), est touchée par les deux pôles d'une pile, mais seulement en deux points A et B des nerfs lombaires mis à nu; on voit aussitôt les membres se contracter. Cette contraction n'a lieu qu'au moment où le contact s'établit; tant qu'il persiste, l'animal reste au repos; lorsqu'il cesse, ce repos n'est pas troublé. Cela a lieu dans quelque sens que l'on fasse cheminer le courant, soit de A vers B, soit de B vers A, du moins quand l'animal est récemment tué, et que *le nerf n'a subi aucune altération*. S'il en est autrement, une interversion se manifeste dans le phénomène : ainsi, dans certains cas, la contraction ne se produit qu'à la rupture du courant. Comme ces interversions sont des effets résultant d'un état morbide, nous ne devons pas nous en occuper ici.



Fig. 370.

Mais il y a deux espèces de nerfs : ceux du mouvement et ceux du sentiment. A la sortie de la moelle épinière, dans le canal rachidien, ils sont séparés ; à la sortie de la colonne vertébrale ils sont déjà réunis : l'expérience précédente était évidemment exécutée à la fois sur les deux espèces de nerfs. Il faut donc, pour s'éclairer d'une manière complète, pousser l'analyse plus loin, il faut agir isolément sur chacun d'eux. Ces nouvelles expériences ont été faites, et elles ont conduit aux résultats suivants :

Si l'on excite exclusivement les nerfs du sentiment, l'animal vivant éprouve de vives douleurs. Il faut agir, bien entendu, sur la partie du nerf qui est attachée à la moelle épinière, c'est-à-dire au centre nerveux. Si l'on excite les nerfs du mouvement, la commotion seule se produit.

876. **Action sur le muscle.** — Agir sur le muscle seul n'est pas une opération facile ; car des nerfs se ramifient dans toutes les profondeurs de l'organisme, et ces nerfs sont nécessairement atteints dès que les pôles sont en contact avec les fibres musculaires. Cependant M. Cl. Bernard est parvenu à résoudre cette difficulté. Il a découvert qu'une substance, le curare, pouvait paralyser le système nerveux sans paralyser les muscles. Une grenouille qu'il empoisonne par le curare, et qu'il prépare ensuite par la méthode de Galvani, ne s'agite plus quand le courant traverse le nerf seulement : en plaçant le muscle sur le trajet du courant, on n'aura donc pas à craindre, cette fois, que l'effet observé se complique de l'excitation produite sur le système nerveux. Or dans ces conditions, le muscle se contracte lorsque les deux pôles sont mis en contact en deux points pris sur le trajet des fibres musculaires. Le mouvement cesse dès que le courant est établi et ne recommence que si, après avoir rompu la communication, on la rétablit de nouveau.

Entre les effets produits sur les muscles et sur les nerfs il y a toutefois cette différence essentielle, que pour faire contracter les premiers il faut employer un courant plus énergique que pour produire une action sensible sur les seconds.

877. **Résumé.** — Ainsi dans la commotion qu'un expérimentateur éprouve il y a trois phénomènes : 1° Excitation des nerfs moteurs ; 2° excitation des nerfs sensitifs ; 3° excitation de la substance propre des muscles. Quant aux autres parties de l'organisme, on a reconnu qu'elles sont purement passives. Toutefois, par un courant intense, des décompositions électro-chimiques altèrent notablement les liquides de l'organisme et des phénomènes physiologiques peuvent être la conséquence de cette modification, mais ce sont là des effets secondaires et non directs de l'électricité.

878. **Courants des muscles et des nerfs.** — C'est ici le lieu de revenir sur le courant propre des animaux que Galvani a constaté le premier. Ce

sujet a été repris, et tout ce qu'il est possible d'affirmer avec quelque certitude se réduit à ceci : L'expérience a montré qu'un muscle coupé (*fig.* 371) forme comme un élément de pile ; à la plaie N est le pôle négatif, à l'endroit sain P le pôle positif. Il en est de même pour les nerfs. Ce courant propre se constate avec le galvanomètre qui sera décrit dans le chapitre suivant.



Fig. 371.

879. **Excitation spéciale de l'électricité.** — Que sont devenues aujourd'hui ces théories hasardées, qui, dans le siècle dernier, attribuaient à l'électricité la fonction de transmettre la volonté? Pures conceptions de l'esprit dépourvues de toute base expérimentale, elles sont réduites à néant. En fait, l'excitation spéciale, produite par l'électricité sur le nerf, n'est pas différente de celle que détermine tout autre agent physique ou mécanique. La chaleur, les actions mécaniques, les actions chimiques, provoquent des contractions toutes semblables à celles que Galvani observait. Un grain de sel, par exemple, lorsqu'il est posé sur l'un des points d'un filet nerveux, cause dans les membres de l'animal la même agitation qu'une excitation électrique.

Mais l'électricité présente ce grand avantage : c'est qu'un courant faible agit instantanément et n'altère pas le tissu nerveux. Quand le courant a été interrompu un moment, il peut reproduire de nouveau l'effet qu'il a déjà donné, et les commotions peuvent se succéder à des intervalles très-rapprochés.

880. **Usage en médecine.**— L'excitation, que produit l'électricité, a été employée en médecine. On a beaucoup tâtonné : aujourd'hui encore on fait bien des essais au hasard ; cependant quelques résultats importants ont été obtenus. Ainsi, quand un nerf malade est devenu incapable de transmettre l'action du centre nerveux, on se sert avec succès de l'électricité pour provoquer les mouvements des muscles, qui, faute d'activité, menacent de dépérir. Par l'activité fréquemment donnée à la fibre musculaire la vie des muscles est entretenue, une seconde maladie ne suit pas nécessairement la première, et le nerf, quand il guérit, se retrouve en rapport avec des organes qui se sont conservés à l'état de santé.

CHAPITRE III

EXPÉRIENCE D'ŒRSTED. — GALVANOMÈTRE.

EXPÉRIENCE D'ŒRSTED.

881. **Historique.** — On avait remarqué depuis longtemps que, la foudre agit sur les aiguilles aimantées dans le voisinage desquelles elle vient à tomber. Tantôt l'aiguille est brusquement déviée, mais elle revient bientôt à sa position primitive; d'autres fois, elle perd en partie son aimantation; tantôt, enfin, l'aimantation se manifeste en sens inverse, et les pôles se trouvent intervertis. Ces phénomènes n'ont été observés que très-rarement, car les circonstances favorables à leur production ne peuvent qu'accidentellement se trouver réunies là où un observateur compétent est prêt à les constater. Mais avec les bouteilles de Leyde, le physicien, dans son cabinet, a pu réaliser, en petit et à volonté, des modifications du même genre, au moyen de l'étincelle électrique.

Avertis par ces faits, guidés d'ailleurs par des idées d'analogie entre le magnétisme et l'électricité, les physiciens, aussitôt que la pile fut découverte, ont cherché à faire agir les courants sur l'aiguille aimantée. Œrsted, convaincu plus peut-être que tout autre et à coup sûr plus persévérant, parvint un jour, par un heureux hasard, à constater la relation dont il soupçonnait la nécessité depuis de longues années. On raconte qu'à l'une de ses leçons le physicien de Copenhague, saisissant vivement les deux fils qui, par leur contact, fermaient le courant électrique, s'écria : « Je ne « puis croire que cet appareil soit sans action sur les aimants; » et, par un geste expressif, il approcha le circuit interpolaire de l'aiguille aimantée; il la vit aussitôt s'écarter de sa position d'équilibre. C'est ainsi qu'au commencement de l'année 1820 fut réalisée l'une des découvertes les plus importantes de notre époque.

882. **Expérience d'Œrsted.** — Aussitôt Œrsted se mit à l'œuvre. Il maintint unis d'une manière permanente les deux rhéophores de la pile, et les plaça, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous de l'aiguille, puis de tous les côtés, et il vit qu'elle se mettait en croix avec le courant, quand la pile était suffisamment énergique. Il nota les différentes positions données au courant, et il mit en regard le sens des déviations correspondantes. Dans

un écrit latin de quatre pages, il fit connaître au monde savant ces résultats remarquables.

Pour répéter l'expérience d'Œrsted, on place en présence de l'aiguille et dans la position indiquée par la figure 372, le courant qui marche de



Fig. 372.

F vers F′, du sud au nord. On voit l'aiguille tourner de telle manière, que son pôle austral se porte vers l'ouest. Le courant est-il placé (*fig.* 373)



Fig. 373.

dans la même direction, mais au-dessous de l'aiguille, on voit le pôle austral se tourner vers l'est.

883. **Énoncé d'Ampère.** — Il était difficile de retenir de mémoire les différents résultats de l'expérience d'Œrsted ; Ampère, par une fiction ingénieuse, est parvenu à les comprendre tous dans un énoncé très-simple. Il imagine un spectateur couché dans le courant, de telle sorte que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête. Ce spectateur regardant l'aiguille, Ampère appelle gauche et droite du courant la gauche et la droite du spectateur ainsi placé, et il résume toutes les expériences d'Œrsted dans ces simples mots : ***Le pôle austral de l'aiguille se dirige toujours vers la gauche du courant.***

En appliquant cet énoncé, il est aisé de reconnaître qu'il se rapporte bien aux deux cas que nous avons signalés dans le § 882.

Si l'on place le courant verticalement, ou bien encore si on le met en présence d'une aiguille d'inclinaison, on peut reconnaître que l'énoncé d'Ampère s'accorde, dans tous les cas, avec l'expérience.

884. **Importance de l'expérience d'Œrsted.** — La découverte d'Œr-

sted fit époque dans la science. En révélant l'action réciproque des aimants et des courants, elle rapprocha de suite deux branches distinctes de la physique que le génie d'Ampère vint bientôt réunir et confondre en une seule. Faraday, à son tour, poursuivant un peu plus tard les mêmes idées, prouva la haute valeur des généralisations auxquelles l'illustre physicien français s'était hardiment élevé; et il en fit la preuve par des expériences qui forment l'un des plus beaux chapitres de l'Électricité.

Mais ce n'est pas seulement par les grandes conséquences qui en découlaient, que l'expérience d'Œrsted a rendu service à la science. Dans un ordre moins élevé, elle fut tout aussi utile. Grâce à sa simplicité, elle permet de reconnaître de suite, sans recourir à de longs préparatifs, le passage d'un courant le long d'un conducteur. Dès lors des essais de tout genre furent tentés, et des découvertes sans nombre vinrent dévoiler des mouvements d'électricité, qui nous seraient encore inconnus sans la méthode simple qu'Œrsted a indiquée. Pour tout dire, il n'en est pas un seul des chapitres qui vont suivre, dans lequel les expériences décrites ou les lois formulées ne soient, directement ou indirectement, des conséquences de la découverte d'Œrsted.

885. **Application.** — Donnons de suite un exemple, mais un exemple simple de la facilité que procure l'expérience d'Œrsted pour reconnaître un courant.

Lorsque le circuit de la pile est fermé, la pile elle-même, avons-nous dit (813), est traversée par un courant qui se dirige du zinc de chaque élément vers le cuivre, le platine ou le charbon de l'autre élément. L'existence de ce courant peut être en effet constatée par l'emploi de l'aiguille aimantée que l'on place sur la pile dirigée du nord au sud magnétique. Tant que les pôles ne sont pas réunis, l'aiguille reste immobile dans le méridien magnétique; mais aussitôt que les rhéophores, qu'on a soin de tenir à distance de l'aiguille, sont en contact l'un avec l'autre, l'aiguille est déviée, et le sens de la déviation prouve que le courant dans la pile se meut du pôle *négatif* vers le pôle *positif*.

GALVANOMÈTRE.

886. **Principe du galvanomètre.** — Mais l'action de la terre qui a dirigé l'aiguille dans le méridien magnétique, représente une force antagoniste qui s'oppose à la production du mouvement que le courant tend à imprimer; et tandis qu'un courant puissant peut mettre l'aiguille en croix avec lui, un courant faible ne la fait tourner que d'une petite quantité, et même, s'il est très-faible, il ne produit qu'un mouvement insensible.

Schweigger, physicien allemand, eut l'idée de multiplier l'action d'un courant sur une aiguille, et il construisit, d'après cette idée, un instrument

nommé *galvanomètre*, et quelquefois *multiplicateur*, à cause du principe théorique qui a servi de point de départ à sa construction. Un courant qui, dans les circonstances de l'expérience d'Œrsted, ne ferait pas dévier sensiblement l'aiguille, lui imprime un mouvement très-facile à constater avec cet instrument.

A cet effet, Schweigger fait tourner le courant de la façon qui est représentée par la figure 374, autour de l'aiguille aimantée suspendue à un fil ou posée sur un pivot : CD, DE, EF, FG, sont les quatre parties du courant qui suit la marche CDEFG. L'aiguille AB se trouve alors soumise à quatre actions distinctes, et, en appliquant l'énoncé d'Ampère, il est aisé de reconnaître que ces quatre actions concourent à diriger le pôle austral du même côté. En effet, le spectateur placé en CD aurait ses pieds en C, sa tête en D, sa face tournée vers l'aiguille, et alors sa gauche en arrière de la feuille de papier, ou, pour mieux dire, vers l'ouest magnétique; le pôle austral ira donc vers l'ouest. Le spectateur se placera sur DE dans la position voulue en descendant le courant, comme le ferait un nageur le long d'une rivière : sa gauche ne changera pas; donc, la partie DE du courant agit pour porter le pôle austral encore vers l'ouest. Les parties EF, FG produiront leur effet dans le même sens.

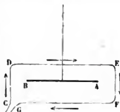


Fig. 374.

887. **Construction du galvanomètre.** — L'aiguille enveloppée par le courant, comme nous venons de le montrer, et soumise à quatre actions concordantes, subira des déviations plus considérables que si le courant passait en ligne droite d'un seul côté de cette aiguille : mais les effets seront augmentés bien davantage si, au lieu d'un seul tour, le fil en fait un grand nombre autour de l'aiguille. Le galvanomètre (*fig.* 375) se compose donc en réalité d'un fil enroulé un grand nombre de fois autour d'un cadre au centre duquel est placée une aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical. Le fil métallique est recouvert de soie sur toute sa longueur, afin que les différents tours juxtaposés soient isolés les uns des autres, et que le courant, qui entre par un des bouts du fil, soit forcé d'en suivre toutes les circonvolutions avant de s'échapper par l'autre extrémité.

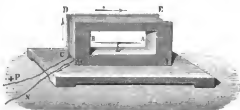


Fig. 375.

L'appareil ainsi disposé est intercalé dans le circuit où l'on veut constater l'existence d'un courant électrique.

887 *bis*. Il est important de savoir dès à présent qu'il n'y a point avantage à multiplier indéfiniment le nombre de tours d'un galvanomètre : au delà d'une certaine limite, l'effet observé devient moindre. L'expérience a montré, en effet, que plus un courant doit faire de chemin, plus il s'affaiblit, et il est des cas, qui seront discutés bientôt, où l'on rendrait plus petite la déviation de l'aiguille en multipliant les tours.

888. **Aiguilles astatiques.** — Nobili a rendu le galvanomètre beaucoup plus sensible en neutralisant partiellement l'action du magnétisme terrestre qui s'exerce constamment sur l'aiguille aimantée et s'oppose à sa déviation. Il obtient ce résultat en formant un système qui se compose de deux aiguilles AB, A'B' (*fig*. 376) égales et presque également aimantées. Ces aiguilles sont fixées à un même axe de cuivre TT' qui les maintient parallèles l'une à l'autre avec leurs pôles dirigés en sens contraire. Un pareil système suspendu à l'extrémité d'un fil de soie sans torsion F, tel qu'il sort du cocon, n'est pas dirigé par l'action du magnétisme terrestre, si les deux aiguilles ont rigoureusement le même degré d'aimantation, et il s'appelle en conséquence système astatique. Il est indifférent à l'action de la terre, parce que, sur les pôles A et A', s'exercent deux forces égales dont les actions se contrarient, l'une agissant pour porter A vers le nord, et l'autre pour y porter A'. Il en est de même de l'action de la terre sur les pôles B et B'.

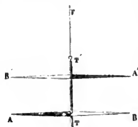


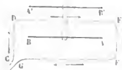
Fig. 376.

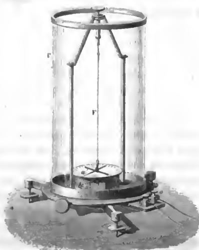
Il serait impossible et d'ailleurs désavantageux d'arriver à obtenir des aiguilles également aimantées, sur lesquelles l'action de la terre resterait absolument nulle. Aussi, le système doué de la plus grande sensibilité, prend-il toujours une direction fixe sous l'influence du magnétisme terrestre; mais comme la force, qui le contraint à se diriger dans le plan du méridien magnétique, n'est que la différence de deux actions presque égales, elle est nécessairement très-faible, et dès lors un courant très-peu énergique lui imprime une déviation. Il est bon d'ailleurs que le système tende à prendre de lui-même une direction fixe : par là, on peut comparer des courants d'une faible intensité, qui produisent alors une déviation d'autant plus considérable que cette intensité est plus grande.

889. **Galvanomètre à aiguilles astatiques.** — Le galvanomètre à aiguilles astatiques se compose du système dont nous venons de parler (*fig*. 376), suspendu à un fil de cocon F. L'aiguille inférieure AB (*fig*. 377) est, à l'intérieur d'un cadre, entourée de fil comme celui du galvanomètre

précédemment décrit. L'aiguille A'B' est à l'extérieur et au-dessus. Une ouverture convenable, percée dans la traverse supérieure du cadre, laisse passer la tige de cuivre qui réunit les deux aiguilles.

Examinons maintenant quelle est l'influence des différentes parties du courant sur le système des deux aiguilles : Soit un courant circulant comme les flèches l'indiquent de C en D, de D en E, de E en F, et de F en G. Nous savons déjà que toutes les actions du courant agissent pour porter le pôle A en arrière de la feuille de papier. Quant aux actions exercées sur l'aiguille A'B', celle de DE s'accorde avec les précédentes ; elle tend à diriger A' en avant, B' en arrière. Le côté du système formé par les pôles A et B' est donc ainsi sollicité à se déplacer dans le même sens. Mais les actions de CD, EF, FG, sont évidemment contraires, et elles tendent à faire tourner A'B', en sens inverse. Cependant, à cause de la moindre distance de DE, l'action de cette dernière portion du courant l'emporte. On le reconnait en plaçant une aiguille seule au-dessus d'un cadre tel que CDEFG ; la déviation du pôle austral qui s'opère montre la prédominance du courant DE sur les trois autres. En résumé, les résultantes des actions, exercées par le courant total sur chacune des deux aiguilles, tendent à les faire tourner dans le même sens, et l'action du courant, presque deux fois répétée, s'exerce sur un système au mouvement duquel une force d'intensité minime fait seule obstacle.


Fig. 377.


Fig. 378.

890. **Emploi du galvanomètre.** — Le système, n'étant pas absolument astatique, revient à sa position dès que le courant cesse, et lorsqu'un courant passe, la déviation croit avec l'intensité du courant. On apprécie cette intensité, sans toutefois la mesurer, en notant le déplacement de l'aiguille supérieure sur un cercle divisé en degrés et disposé au-dessous d'elle ; le rayon passant par le zéro du cadran est toujours placé à l'avance dans le plan du méridien magnétique ; la graduation part de ce zéro et continue à droite et à gauche.

Lorsque l'on veut se servir du galvanomètre, on fait tourner l'appareil jusqu'à ce que l'aiguille soit en équilibre devant le zéro. On fait passer le courant, et l'on estime qu'il est plus ou moins intense, selon que la déviation est plus ou moins considérable. D'ailleurs, le sens du courant est très-aisé à reconnaître, en se fondant sur l'expérience d'Œrsted. Si l'on veut déterminer son intensité, il faut recourir à une graduation préalable de l'appareil par une méthode analogue à celle qui a été décrite (525). Nous reviendrons sur cette question dans le chapitre qui va suivre.

Enfin, ajoutons que les deux bouts du fil du galvanomètre se rendent à deux petites colonnes *o*,*o*, et c'est là qu'on fixe, au moyen d'une vis à bouton, les fils métalliques qui doivent amener le courant ; la cloche en verre C recouvre constamment l'appareil pour empêcher que les agitations de l'air ne dérangent l'aiguille.

891. **Sensibilité du galvanomètre.** — La sensibilité d'un galvanomètre bien construit peut être accusée par plusieurs expériences. Voici l'une des plus simples : Deux fils, l'un de zinc, l'autre de cuivre, sont plongés dans l'eau ordinaire et forment, comme on le voit, une pile, mais une pile très-faible. Que l'on réunisse chacun de ces fils à l'un des bouts du fil d'un galvanomètre, et si l'instrument est bien construit, les aiguilles seront immédiatement envoyées à 90° de leur position d'équilibre.

Un autre exemple peut être encore cité : Si l'on coupe un muscle de grenouille, et que l'on touche la surface du muscle et la plaie qui vient d'être faite avec deux lames de platine bien nettoyées et communiquant chacune avec l'un des bouts du fil du galvanomètre, l'instrument devra accuser, s'il est très-sensible, l'existence d'un courant allant dans le circuit métallique de la partie intacte vers la plaie.

892. **Polarisation des électrodes.** — Enfin, le galvanomètre a servi à découvrir une modification importante, que subissent les électrodes de platine employées à la décomposition de l'eau, modification qui les rend aptes à former par leur association une espèce de pile. La lame, qui a servi d'électrode négative, s'est chargée d'hydrogène, et cet hydrogène déposé est comme un métal oxydable, qui enveloppe le platine ; il joue si bien ce rôle que la lame, qui le porte, peut désormais constituer le pôle négatif d'une pile dont l'autre lame représentera le pôle positif. Pour rendre manifestes les résultats que nous venons d'indiquer, on décompose l'eau dans un voltamètre ; après que la décomposition a duré quelque temps, on enlève la pile ; on réunit les lames du voltamètre avec le fil d'un galvanomètre, et une déviation considérable a lieu dans le sens que nous venons d'indiquer.

Ce phénomène, qui se manifeste à la suite de toutes les décompositions opérées par la pile, s'appelle la polarisation des électrodes. Il ne se produit pas seulement à l'extérieur de la pile ; il a encore lieu dans chaque

élément à la suite des décompositions qui s'y accomplissent. L'hydrogène, en se déposant sur la lame non attaquée, la polarise; il résulte de ce dépôt d'une force électro-motrice qui détruit en partie celle qui provient de l'action de l'eau acidulée sur le zinc, et c'est là, nous le savons, une des causes principales de l'affaiblissement des piles voltaïques. La pile construite par Daniell, celle de Bunsen, et les piles analogues, en empêchant le dépôt d'hydrogène, s'opposent à la polarisation et par suite aux effets nuisibles qu'elle engendre.

893. **Pile à gaz de Grove.** — Un physicien anglais, M. Grove, a mis à profit la polarisation dont nous venons de parler, pour construire une pile assez curieuse. Que l'on imagine une série de voltamètres, dont les lames de platine s'élèvent le plus haut possible dans les éprouvettes. Ces voltamètres étant placés en série, comme dans l'expérience de Faraday (846), on fait passer un courant qui les traverse tous, et dès lors les éprouvettes s'emplissent de gaz. Si à un moment donné on fait cesser le courant, la série des voltamètres forme une pile véritable : la dernière lame qui plonge dans l'hydrogène est le pôle négatif; la première qui plonge dans l'oxygène, le pôle positif.

Avec cette pile, on peut produire tous les effets des piles ordinaires, commotion, étincelle, décompositions chimiques, etc. A mesure qu'elle fonctionne, les gaz qui remplissaient les éprouvettes disparaissent peu à peu : pour que la pile continue à marcher, il suffit d'introduire de l'hydrogène et de l'oxygène dans chacune d'elles, et cela par un procédé quelconque. C'est même uniquement pour rendre l'explication plus simple que nous avons supposé d'abord les gaz obtenus par décomposition de l'eau : tout autre mode de production eût été aussi bon.

CHAPITRE IV

INTENSITÉ DES COURANTS.

894. Que l'on passe en revue les différentes expériences exécutées avec la pile, et l'on reconnaîtra qu'elles ont toutes été réalisées en utilisant le courant d'électricité que l'on obtenait par la réunion des deux pôles. Tantôt, le courant exerçait une action extérieure, comme par exemple dans l'expérience d'Œrsted; tantôt l'action se manifestait exclusivement sur le corps que l'électricité traversait, et c'est ainsi qu'elle opérait la décomposition de l'eau et des sels. Cependant les physiciens sont restés

assez longtemps sans connaissances précises sur les causes qui font varier l'intensité du courant. En 1827, Ohm et Fechner, et peu de temps après M. Pouillet, sont parvenus à déterminer les lois suivant lesquelles elle varie. Ce sont ces lois que nous allons exposer actuellement.

895. **L'intensité d'un courant diminue quand la longueur du circuit augmente.** — Un fait facile à constater s'est présenté dès l'origine des études qui ont été entreprises sur les courants voltaïques, et il a dû être observé par tous ceux qui se sont occupés d'expériences où le courant était mis en activité : Un courant devient moins énergique si l'on intercale un corps dans le circuit déjà existant, ce corps fût-il même très-bon conducteur de l'électricité. Le courant de la pile P (*fig.* 379), placé à une distance déterminée entre un système d'aiguilles à peu près astatiques, lui fait subir une déviation ; vient-on à séparer les deux rhéophores PF et NF' et à intercaler entre eux un fil long et fin CC'? le nouveau courant, qui passe, produit, quand il est placé à la même distance et dans la même position relativement aux aiguilles, une déviation moindre du système. A cet exemple on peut en joindre un second : Une pile employée à décomposer l'eau dans le voltamètre V donne, par minute, un volume de gaz que l'on mesure. Augmente-t-on la longueur du circuit interpolaire, en opérant comme précédemment ? le volume de gaz dégagé, par minute, se trouve diminué.

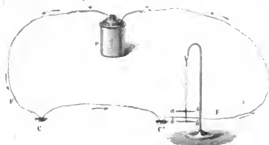


Fig. 379.

L'expérience permet aussi de reconnaître que la nature des conducteurs intercalés entre C et C' a une grande importance : deux fils de même longueur et de même diamètre, mais appartenant à des métaux différents, ne diminuent pas également l'intensité du courant. Un fil de fer la réduit beaucoup plus que ne le ferait un fil d'argent de même section et de même longueur.

896. L'intensité du courant n'est pas notablement modifiée, lorsque le conducteur ajouté est une masse métallique d'une très-petite longueur et d'une grande section. Ainsi un fil de fer de quelques centimètres de longueur et de plusieurs millimètres carrés de section, intercalé dans le circuit, ne modifie pas sensiblement l'intensité du courant fourni par une pile de Daniell. De même on peut mettre en communication directe les deux rhéophores d'une pile, ou bien les faire plonger à la fois dans une

grande masse de mercure contenue dans une capsule, le courant n'est pas modifié par ce changement. Nous mettrons très-souvent à profit ce résultat ; au lieu de réunir deux fils directement, nous nous servirons habituellement d'une capsule pleine de mercure dans laquelle plongeront les fils, qui doivent communiquer ensemble, ou bien encore ces fils seront réunis par l'intermédiaire de pièces de métal courtes et de large section.

897. **Sens qu'il faut attacher à cette expression : intensité d'un courant.** — Jusqu'ici, le mot intensité du courant, souvent employé dans les pages qui précèdent, n'a eu qu'une signification vague ; il n'a exprimé autre chose que la faculté que possède le courant de produire des effets plus ou moins considérables. Dans aucune expérience, nous n'avons donné de méthode directe pour déterminer cette intensité, pour exprimer numériquement les valeurs différentes qu'elle peut acquérir. Demandons maintenant dans quel cas on est en droit de dire que l'intensité d'un courant est double, triple de celle d'un autre courant. Évidemment, c'est quand le premier courant, en agissant dans les mêmes conditions, est capable de produire le même effet que deux, trois courants égaux à celui qui est pris pour terme de comparaison. On définira de même un courant d'intensité quatre fois, cinq fois plus grande, etc.

898. **Mesure des intensités des courants. — Principe de la méthode.** — Eh bien ! l'expérience d'Œrsted donne un moyen facile d'effectuer la comparaison dont nous venons de parler. En effet un courant mis en présence d'une aiguille aimantée produit-il une certaine déviation ? un second courant mis à la place du premier, produit-il la même déviation? il est évident que ces courants sont égaux. Vient-on à les faire agir simultanément tous les deux sur l'aiguille en les mettant côte à côte et, autant que possible, dans la position qu'ils occupaient d'abord ? il est clair que la déviation devra être plus considérable qu'auparavant sous l'action de la force double qui intervient cette fois. Dans certains cas, l'écart de l'aiguille sera rendu deux fois plus grand; dans d'autres, l'excursion de l'aiguille n'atteindra pas tout à fait cette limite ; mais peu nous importe : il n'en est pas moins vrai que la déviation produite sera l'effet d'une action double de celle qui intervenait quand le premier courant était seul en présence de l'aiguille. Ceci posé, si un courant nouveau employé seul, succédant aux deux autres, et occupant la même place, produit la même déviation que les deux réunis, il aura évidemment une intensité double de celle que possède chacun d'eux isolément.

899. **Réalisation de la méthode précédente.** — Pour obtenir une graduation qui rende facile la comparaison des intensités des courants, le mieux est d'employer une aiguille aimantée horizontale suspendue par

un fil au centre d'un cercle vertical de grandes dimensions VV' (*fig.* 380), de telle façon que l'aiguille soit mobile autour d'un axe vertical VV' représenté par l'un des diamètres du cercle. Un limbe horizontal gradué placé au-dessous de l'aiguille permet de noter les déviations. Avant toute expérience, le cercle vertical est amené dans le plan du méridien magnétique, et l'aiguille s'arrête alors au zéro. Tout étant ainsi préparé, les deux pôles d'une pile à courant constant sont réunis par un fil F (*fig.* 381) de plusieurs mètres de longueur et recouvert de soie. On fait faire à ce fil un tour seulement sur le cercle vertical, l'aiguille dévie, on note la déviation. On fait faire au même fil, dont la longueur n'est pas changée, deux tours sur le cercle vertical; alors sur l'aiguille, agissent deux courants égaux au pré-

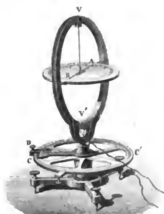


Fig. 380.

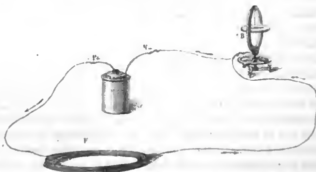


Fig. 381.

cédent et placés dans les mêmes positions relatives; on note la nouvelle déviation : elle correspond à une intensité double. De même on fait faire successivement 3, 4, 5, 6, 7 tours au fil, et on a des déviations qui indiquent des actions 3, 4, 5, 6, 7 fois plus intenses. Une table qui contient dans une première colonne les intensités 1, 2, 3, et dans une seconde colonne placée en regard les déviations correspondantes, sera construite pour être consultée à l'avenir.

900. Veut-on savoir maintenant quel rapport il existe entre les intensités de deux courants? On enroulera autour du cercle vertical une partie du cir-

cuit dans lequel chemine le premier courant, on notera la déviation de l'aiguille. On observera en second lieu la déviation produite par l'autre courant enroulé sur le même cercle et dans les mêmes conditions. Dès lors, en consultant la table déjà construite, on aura les intensités des deux courants, et par suite le rapport de ces intensités.

901. **Boussole des tangentes.** — Lorsqu'on gradue l'appareil par la méthode que nous avons indiquée, si l'aiguille est très-courte (*) et le cercle vertical d'un grand rayon, l'expérience justifie ce que le calcul indique, à savoir : que les tangentes trigonométriques des déviations sont à très-peu près proportionnelles aux intensités des courants. Nous supposerons que l'appareil qui est entre nos mains satisfasse à ces conditions; c'est précisément celui que M. Pouillet a inventé, et qu'il a nommé *boussole des tangentes*.

902. **Mesure des intensités des courants par les décompositions chimiques.** — La boussole a été choisie tout d'abord, pour résoudre la question qui nous occupe, parce qu'elle offre le moyen le plus simple, le plus rapide d'effectuer les mesures d'intensités des courants, mais d'autres appareils pourraient être utilisés dans le même but avec tout autant de sûreté et donner des résultats aussi précis. Les décompositions chimiques serviraient très-bien de base à une méthode de mesure, aussi les a-t-on quelquefois employées à cet usage. Un courant double d'un autre doit, dans le même temps, décomposer une quantité d'eau deux fois plus grande. Les deux méthodes s'accordent parfaitement, et une expérience simple le démontre. Un courant qui passe à travers la boussole des tangentes et en même temps à travers un voltamètre, développe toujours en un temps donné des quantités de gaz proportionnelles aux intensités qu'accuse l'aiguille aimantée.

903. **Conductibilité. — Résistance.**— L'expérience faite dans le § 895 nous force à considérer les corps conducteurs sous deux points de vue : le premier est celui avec lequel notre esprit s'est familiarisé jusqu'ici et qui nous les fait regarder comme doués de la propriété de laisser cheminer l'électricité à travers leur masse, propriété qu'on désigne d'une manière générale par ce mot : conductibilité. Le second nous fait envisager les conducteurs interposés sur le trajet du courant comme des obstacles, comme des résistances que le courant doit surmonter pour continuer sa marche et qu'il ne surmonte qu'en s'affaiblissant. Un corps est-il très-conducteur, sa résistance est faible : conductibilité et résistance expriment donc des propriétés inverses l'une de l'autre.

904. **Unité de résistance.**—Ces résistances, qui amoindrissent l'inten-

(*) Dans ce cas, pour pouvoir observer les déviations de l'aiguille, on fixe sur elle une lame de cuivre longue et très-légère, qui, en se déplaçant sur le cercle divisé, permet d'estimer les écarts angulaires de l'aiguille aimantée.

sité du courant, ont des valeurs qu'il importe de déterminer ; car, lorsque ces valeurs seront connues, l'effet de tout conducteur traversé par le courant pourra être facilement apprécié, et dans l'emploi des piles, on ne procédera plus au hasard, comme on l'a fait trop souvent. Avant tout, il faut choisir une unité de résistance qui se retrouve aisément identique à elle-même. La substance, qui la composera, doit pouvoir être facilement obtenue dans un état bien défini, tant au point de vue chimique qu'au point de vue physique. Il est évident, à l'avance, que les fils métalliques ne réalisent pas cette condition ; leur structure dépend des actions mécaniques auxquelles ils ont été antérieurement soumis : l'écrouissage, le recuit, la torsion, etc., et, d'autre part, il est peu de métaux usuels qui puissent être préparés avec un degré suffisant de pureté. Deux fils de cuivre, égaux en longueur et en section, ne présentent presque jamais des résistances égales; substitués l'un à l'autre dans un circuit, ils ne s'équivalent pas absolument, et le courant est modifié par cette substitution. Le mercure, au contraire, est un métal très-facile à purifier ; par le fait même de sa liquidité à la température ordinaire, sa structure physique ne souffre pas de modifications : c'est donc ce métal que nous choisirons, à l'exemple d'ailleurs de la plupart des physiciens, et nous définirons l'unité de résistance : La résistance d'une colonne de mercure qui aurait pour longueur 1 mètre, et pour section 1 millimètre carré. Quand une pareille colonne liquide sera introduite dans un circuit, nous dirons que nous avons ajouté une unité de résistance; quand la colonne de mercure gardant la même section variera de longueur, la résistance interposée sur le trajet du courant variera, elle aussi, dans le même rapport.

Dans les expériences qui vont suivre, nous emploierons des tubes LL'

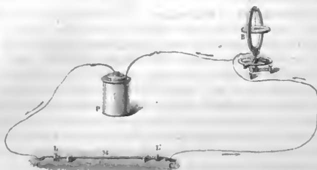


Fig. 382.

(*fig.* 382) de 1 millimètre carré de section, pleins de mercure : les uns auront une longueur de 1 mètre, les autres de 1/2 mètre, de 1/4 mètre, etc.

ils seront fermés à leur extrémité par des garnitures de fer auxquelles des fils de cuivre gros et courts LC, L'C' seront fixés ; de sorte que, d'après ce qui a été dit (896), les résistances des garnitures et des fils soient négligeables.

905. **Mesure des résistances.** — Prenons une pile P (*fig.* 382), une boussole et les différents conducteurs dont la résistance doit être appréciée. Le courant passe d'abord par un fil de cuivre partant du pôle positif de la pile, puis il traverse une colonne de mercure LL' de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre carré de section, ensuite il continue sa marche par le fil de cuivre qui circule autour de la boussole, et il aboutit finalement au pôle négatif de la pile. On note la déviation de l'aiguille. Cette première observation faite, on substitue à la colonne de mercure un fil de fer F (*fig.* 383)

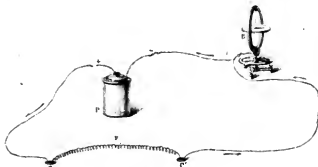


Fig. 383.

de 1 millimètre carré de section, et l'on trouve que ce fil doit avoir une longueur de 6 mètres pour que l'intensité du courant ne change pas. Si le corps conducteur qui remplace la colonne mercurielle est un fil de platine de 1 millimètre carré de section, on reconnaît que ce fil doit avoir une longueur de 8 mètres pour que l'aiguille aimantée éprouve la même déviation. En continuant à opérer de la même façon, on mesure successivement les longueurs des fils formés par différents métaux, qui, à égalité de section, opposent une résistance égale au passage du même courant. Voici les nombres obtenus :

Mercure	1
Fer	6
Platine	8
Cuivre	38
Argent	39
Or	61
Palladium	60

906. **Loi des longueurs.**—Si la longueur de la colonne de mercure prise pour terme de comparaison avait été réduite à moitié, il est évident, d'après ce qui a été dit, que les longueurs des différents fils, qui pourraient lui être substituées, se seraient trouvées la moitié de celles qui ont été déterminées précédemment. Il est d'ailleurs possible de s'en assurer par l'expérience. Un fil de fer de 1 millimètre carré de section, et de 3 mètres de longueur, oppose une résistance égale à $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire peut être substitué à une colonne de mercure d'un demi-mètre de longueur. Ce que l'on peut exprimer ainsi : *Les résistances sont en raison directe des longueurs.*

907. **Résistance spécifique. — Conductibilité.**— Puisqu'un fil de fer de 6 mètres de longueur représente une résistance égale à l'unité, un fil de fer de 1 mètre représentera une résistance égale à $\frac{1}{6}$. Cette résistance opposée par un fil métallique de 1 mètre de long et de 1 millimètre carré de section, est ce que nous appellerons la *résistance spécifique* du métal. La résistance spécifique du fer sera donc $\frac{1}{6}$ ou 0,166; de même la résistance d'un fil de platine long de 1 mètre sera $\frac{1}{8}$ ou 0,125, et ce nombre exprimera la résistance spécifique du platine; on a ainsi le tableau suivant :

RÉSISTANCES SPÉCIFIQUES.

Fer	0,166
Platine	0,125
Cuivre	0,026
Argent	0,025
Or	0,019
Palladium	0,016

D'après ce que nous avons dit sur la relation qui existe entre la résistance et la conductibilité d'un corps, il est clair qu'un fil de fer, qui oppose à égalité de longueur et de section une résistance six fois plus petite qu'une colonne de mercure, doit être regardé comme six fois plus conducteur, et alors la conductibilité sera représentée par les nombres mêmes qui se trouvent dans le tableau du § 905.

908. **Loi des sections.** — Au lieu de prendre des fils métalliques dont la section soit de 1 millimètre carré, on peut opérer avec des fils d'une section double, triple, quadruple. Un fil de fer, dont la section est de 2 millimètres carrés et la longueur de 6 mètres, ne peut pas se substituer à l'unité de résistance, comme le faisait un fil de section 1 et de même longueur, mais il peut remplacer une colonne de mercure de $\frac{1}{2}$ mètre de longueur et

produire le même effet qu'elle. De même, si la section du fil devient triple, la longueur de la colonne de mercure qui sert de type devra être réduite au tiers. Ainsi *les résistances varient en raison inverse des sections.*

909. **Résistance d'un fil quelconque.** — Ces lois indiquent la méthode, qu'il faut suivre, pour évaluer numériquement les résistances des divers conducteurs composant un circuit. Parmi ces conducteurs existe-t-il un fil de fer dont la longueur soit de 4 mètres, et la section de 7 millimètres carrés? Pour connaître la résistance de ce fil, on n'aura qu'à résoudre une question qui peut se poser sous cette forme très-simple :

0,166 est la résistance d'un fil de fer de 1^m de longueur et de 1^{mm} carré de section.
Quelle sera la résistance x............ 4^m — 7^{mm} —

D'où la résistance cherchée est :

$$x = \frac{0,166 \times 4}{7}.$$

Et en général si l est la longueur d'un fil, s sa section, ρ sa résistance spécifique on aura :

$$x = \frac{\rho \times l}{s}.$$

910. **Résistance des liquides.** — Les mêmes lois s'appliquent aux liquides, et la même méthode d'expérimentation peut être employée pour évaluer leur résistance. Toutefois, il faut prendre certaines précautions à cause des phénomènes électrolytiques, qui ont lieu aux points où les liquides sont en communication avec les électrodes.

On introduit d'avance dans le circuit le liquide que l'on a renfermé dans

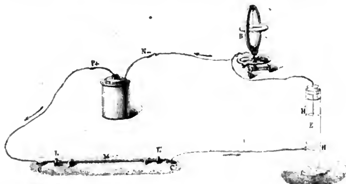


Fig. 384.

une éprouvette cylindrique E (*fig.* 384), au fond de laquelle se trouve une lame métallique horizontale H qui occupe la section de l'éprouvette.

Vis-à-vis de cette lame, on en a placé une seconde H′ dont les dimensions sont les mêmes et qui occupe, comme elle, toute la largeur de l'éprouvette. L'expérience est disposée de telle sorte que le courant traverse successivement la colonne de mercure, le liquide à étudier et la boussole des tangentes. L'aiguille de la boussole indique une certaine déviation : on enlève du circuit la colonne de mercure; la déviation augmente, on la ramène à ce qu'elle était primitivement en écartant les lames qui se trouvent dans le liquide. L'éprouvette a-t-elle une section de 30 centimètres carrés et contient-elle une dissolution saturée de sulfate de cuivre? les plaques doivent être éloignées de $0^m,01$ pour que le courant ne change pas de valeur après que la résistance 1 a été enlevée. La section de l'éprouvette est-elle de 15 centimètres carrés, l'éloignement des plaques doit être le même pour représenter une résistance égale à 2. Ces expériences donnent les lois déjà trouvées pour les métaux ; elles peuvent servir à calculer la résistance spécifique des liquides, et lorsque celle-ci est connue, il est aisé d'en déduire la résistance d'une colonne liquide de dimensions quelconques. Pour le moment nous nous occuperons seulement de déterminer la résistance spécifique de la dissolution saturée du sulfate de cuivre. Une colonne de la dissolution ayant 30 centimètres carrés ou 3 000 millimètres carrés de section, et $0^m,01$ de longueur, a pour résistance 1 : c'est ce que l'expérience vient de nous donner. D'après cela, une colonne de 1 millimètre carré de section et 1 mètre de longueur aura pour résistance :

$$\rho = \frac{3000}{0,01} = 300000.$$

La résistance spécifique du sulfate de cuivre en dissolution est donc 300 000 fois celle du mercure ; celle des autres dissolutions salines est, du reste, du même ordre de grandeur.

911. **Loi d'Ohm.** — *L'intensité du courant donné par un élément de pile varie en raison inverse de la somme des résistances qui composent le circuit.* On doit comprendre dans cette somme tout aussi bien les résistances intérieures opposées par les liquides servant à constituer l'élément même de la pile, que les résistances extérieures des conducteurs réunissant les deux pôles.

Voici une méthode très-simple, qui permet de comprendre comment on peut vérifier cette loi si merveilleuse par sa simplicité et si féconde par ses applications. Une auge rectangulaire AA′ (*fig.* 385) contenant de l'acide sulfurique étendu d'eau, reçoit deux lames rectangulaires verticales et parallèles, l'une de zinc amalgamé Z dont la surface est presque égale à la section de l'auge; l'autre d'argent platiné P, qui est de mêmes dimensions que la première; l'ensemble forme une pile de Smee. Le courant de

cette pile passe par un fil de cuivre PC, qui plonge dans une capsule pleine de mercure C, il s'enroule ensuite sur la boussole des tangentes B et

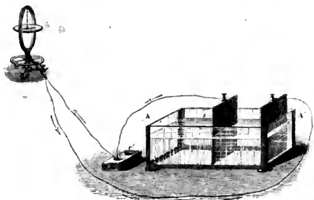


Fig. 385.

aboutit finalement au pôle négatif de la pile. L'aiguille aimantée dévie, et par la déviation produite, on connaît l'intensité du courant. On écarte alors les deux lames de manière que leur distance soit par exemple triplée; on allonge le fil de cuivre de telle sorte que sa longueur soit aussi triplée. Évidemment, la somme des résistances intérieures et extérieures de la pile est devenue trois fois plus grande. On regarde l'aiguille aimantée, et la déviation qu'elle accuse fait voir que l'intensité du courant est réduite au tiers, ce qui démontre la loi énoncée.

912. **Formule.** — Si donc on appelle E l'intensité du courant qui serait produit si la somme des résistances tant intérieures qu'extérieures avait pour valeur totale l'unité; quand la résistance totale deviendra R, on aura pour l'intensité I du nouveau courant: $I = \frac{E}{R}$. Et si l'on exprime l'ensemble des résistances par deux termes: l'un qui donne la mesure de la résistance intérieure de la pile, et que l'on nomme R, l'autre qui représente la résistance extérieure et que l'on nomme r, la formule devient alors: $I = \frac{E}{R+r}$.

913. **Force électro-motrice.** — Avant d'appliquer cette formule, il importe de bien comprendre la signification de toutes les quantités qu'elle renferme. Déjà nous avons insisté assez longuement sur le sens que l'on doit donner à I, R et r; mais E, qui vient de s'introduire à l'instant, est une quantité d'une nouvelle espèce dont il faut se rendre compte. De quoi dépend-elle? Elle ne dépend aucunement des résistances extérieures, car toutes ces résistances ont été introduites dans le terme r; elle est indépen-

dante aussi de la résistance du liquide intérieur de la pile, car cette résistance est comprise dans le terme R. Écarte-t-on les lames qui constituent l'élément? R change, mais E reste invariable. Enlève-t-on le liquide de l'auge, de sorte que les métaux plongent à peine dans la pile presque à sec? R augmente, mais E ne change pas. Qu'un élément soit microscopique ou qu'il présente des dimensions gigantesques, E est toujours le même, pourvu que la nature des métaux et des liquides, qui le constituent, ne change pas. Mais la quantité E, qui exprime dans la formule l'intensité du courant de la pile quand la somme des résistances est égale à l'unité, possède une valeur très-différente quand on fait varier ou les métaux ou les liquides de l'arrangement voltaïque; elle dépend, en un mot, de la nature de l'élément, elle représente la puissance, que chaque combinaison voltaïque de nature particulière, manifeste lorsque les obstacles qui se trouvent dans chaque circuit sont les mêmes : on l'a appelée la *force électro-motrice*.

914. **Réunion de plusieurs éléments.** — Jusqu'à présent, la théorie, qui vient d'être établie, ne l'a été que pour un seul élément. Que deviendra la formule précédente quand la pile sera constituée? Soient, par exemple, 4 éléments de Daniell égaux et disposés en série, c'est-à-dire tels que le cuivre de l'un communique avec le zinc de celui qui le suit, et cela d'un bout de la pile à l'autre; supposons, de plus, les pôles de cette pile réunis par un conducteur de résistance r, appelons E et R la force électro-motrice et la résistance de chaque couple. Tout d'abord, on reconnaît que la résistance totale du circuit se compose de 4R, résistance des 4 éléments augmentée de r, la résistance extérieure. Le premier élément seul donnerait, en traversant un pareil circuit, un courant dont l'intensité serait $i = \frac{E}{4R + r}$; le second donnerait un courant de même intensité, et ainsi des autres. Ces quatre courants, qui marchent dans le même circuit, s'ajoutent, et l'on a pour l'intensité totale :

$$I = \frac{4E}{4R + r}.$$

En général on a par conséquent pour n éléments

$$I = \frac{nE}{nR + r}.$$

915. **Applications de la formule.** — La formule générale que nous venons d'écrire renferme la solution de toutes les questions, qui se présentent dans l'emploi de la pile; elle permet de prévoir, pour chaque disposition adoptée, l'intensité du courant qui parcourra un circuit fermé. Voici les cas les plus intéressants.

916. **Cas où la résistance extérieure est faible.** — Une pile doit être

employée à faire passer un courant à travers un fil interpolaire dont la résistance est faible. On veut, par exemple, répéter l'expérience d'Œrsted, et obtenir les effets les plus intenses; que gagnera-t-on à employer un grand nombre d'éléments? La résistance extérieure des rhéophores étant égale à 1, celle de la pile sera 100, je suppose (je la prends égale à 100, car nous savons que la résistance des liquides est très-grande). Employons d'abord un seul élément. L'intensité du courant sera donnée par l'égalité :

$$I_1 = \frac{E}{100 + 1};$$

puis deux : l'intensité du courant deviendra :

$$I_2 = \frac{2E}{200 + 1} = \frac{E}{100 + \frac{1}{2}};$$

mettons-en trois; on aura :

$$I_3 = \frac{E}{100 + \frac{1}{3}}, \text{ etc.}$$

ce qui signifie que, dans un cas pareil, l'intensité du courant conserve sensiblement la même valeur $\frac{E}{100}$, quel que soit le nombre des éléments; et que l'on ne gagnera rien ou presque rien à augmenter ce nombre, du moins tant que la disposition en série sera adoptée; la dépense sera donc faite sans profit : car un seul élément donnerait les mêmes effets.

916 *bis*. **Meilleure disposition à donner à l'élément.** — Mais n'y a-t-il pas telle disposition qui rendra plus considérable l'effet qu'on veut obtenir? La formule montre que ce but sera atteint si l'on réduit à une valeur moindre la résistance de l'élément. Or, deux moyens se présentent pour diminuer cette résistance : l'un consiste à rendre plus petite la longueur du conducteur qui la constitue, l'autre à en augmenter la section. A l'intérieur d'une pile, ces deux moyens peuvent être employés : le premier sera réalisé par le rapprochement des lames, le second par leur développement en surface. Au lieu de l'élément qui nous servait, prenons-en un autre, tel que chaque lame plongée dans le liquide intérieur ait une surface double; la résistance sera réduite à 50, et l'intensité du courant presque doublée. Sans rien changer aux surfaces plongées, rendons la distance qui les séparait moitié moindre, la résistance intérieure sera encore réduite à moitié, et le courant deviendra deux fois plus intense.

Wollaston, quoiqu'il ne connût point les lois générales qui régissent les intensités des courants, les avait cependant pressenties, lorsqu'il construisit la pile qui porte son nom. Il rapprocha beaucoup le zinc et le cuivre, qui se trouvaient souvent très-éloignés l'un de l'autre dans les piles

à couronne, et de plus, en enveloppant le zinc avec la lame de cuivre il doubla la surface de l'élément : ces deux perfectionnements réalisent les conditions les meilleures que la théorie ait indiquées.

917. **Éléments associés par les pôles de même nom.**— Des éléments, quelque petits qu'ils soient, peuvent, par un mode de groupement convenable, former des éléments à grande surface : il suffit de les réunir entre eux par les pôles de même nom, c'est-à-dire charbon avec charbon et zinc avec zinc.

Deux éléments de Bunsen sont-ils unis de cette manière ? ils constituent un élément double, dont la résistance intérieure sera réduite à moitié. En effet, complétons le circuit par un fil métallique, l'électricité circulera à la fois par les deux éléments ; elle n'aura pas les deux résistances successives à surmonter, elle aura à vaincre une résistance moitié moindre $\frac{R}{2}$. Quant à la force électro-motrice, elle sera toujours demeurée égale à E; et si la résistance extérieure est faible, l'intensité du courant, comme nous l'avons dit, sera doublée par cette association.

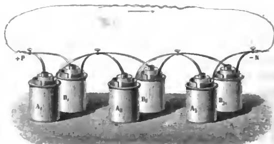


Fig. 386.

La figure 386 représente six éléments unis deux à deux de manière à former une pile de trois éléments de surface double. La figure 387 montre une disposition équivalente mais plus commode dans la pratique. La pile ainsi montée est formée en *batterie*.

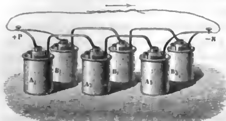


Fig. 387.

918. **Cas où la résistance extérieure est considérable.** — La résistance extérieure est-elle considérable ? par exemple R est-il égal à 100 et r à 100 000? c'est le cas où

l'on veut faire traverser au courant des fils longs et fins. Avec un élément, l'intensité est :

$$I_1 = \frac{E}{100 + 100\,000};$$

avec deux éléments :

$$I_2 = \frac{2E}{200 + 100\,000} = \frac{E}{100 + 50\,000} = \frac{E}{50\,100}, \text{ etc.}$$

Le résultat est tout différent du précédent. le dénominateur de I_2 est presque moitié de celui de I_1 ; ainsi avec deux éléments, l'intensité du courant est presque doublée. Dans ce cas particulier, il y aura donc avantage à augmenter le nombre des éléments qu'on disposera en série.

919. **Choix d'un galvanomètre.** — Si le fil, qui s'enroule sur un galvanomètre, est tel que chacune de ses circonvolutions oppose une résistance r tout à fait négligeable, par rapport à la somme $R + r'$ des autres résistances du circuit, l'intensité du courant n'est pas sensiblement modifiée par l'introduction de ce galvanomètre : l'action exercée sur les aiguilles grandit avec le nombre de tours que décrit le fil, et l'instrument mérite son nom de multiplicateur. Mais dans le cas où r' serait très-grand par rapport à $R + r$, le galvanomètre devrait être abandonné ; car la résistance qu'il opposerait réduirait l'intensité du courant, sans compensation suffisante (*) ; il serait préférable de faire agir le circuit primitif, ne dût-il que passer une seule fois entre les aiguilles astatiques. Entre ces deux cas extrêmes se trouvent tous les intermédiaires.

La qualité d'un galvanomètre est donc toute relative, et dépend essentiellement des résistances opposées par les autres parties du circuit. La valeur de $R + r$ est-elle faible? il faut que celle de r' soit très-petite : ce qui exige que le fil de l'instrument soit d'un fort diamètre. Mais à mesure que les tours se superposent, ils se trouvent en moyenne plus éloignés des aiguilles; par cet éloignement qui grandit vite, quand le fil est gros, l'action du courant est moins puissante : au delà d'une certaine limite, il n'y a qu'à perdre en continuant l'enroulement. Cette condition que le fil soit gros, entraine donc cette autre : qu'il soit court.

Si, au contraire. $R + r$ est considérable, le fil, qui forme la résistance r', pourra être fin sans inconvénient, et même cette finesse aura l'avantage de permettre l'enroulement d'un plus long fil, qui multipliera l'action un nombre plus considérable de fois.

(*) Soient $r' = 100\,(R + r)$ et 20 le nombre de tours du fil du galvanomètre : l'intensite du courant, qui eût été $I = \frac{E}{R + r}$ devient $i = \frac{E}{R + r + 20 \times 100\,(R + r)}$, ou à peu près $\frac{1}{2001}$ de I; la perte d'intensité qui ne sera pas compensée par l'action répétée des 20 tours.

CHAPITRE V

AIMANTATION PAR LES COURANTS. — TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

920. **Action du courant sur la limaille de fer.** — Aussitôt que l'expérience d'Œrsted fut connue, Arago (septembre 1820) essaya l'action du courant sur le fer doux. Un fil de cuivre traversé par un courant énergique fut plongé dans la limaille de fer, et il en sortit emportant avec lui une portion de cette limaille adhérente. De ce fait, Arago conclut que le courant agit non-seulement sur l'aiguille aimantée, mais encore sur le fer doux, qui n'a pas reçu une aimantation préalable. Toutefois, il se demanda si le phénomène était bien dû au courant, et ne devait pas être attribué à une certaine quantité d'électricité libre qui, répandue sur le fil, reproduirait le phénomène bien connu de l'attraction des corps légers. Pour s'en assurer, il plongea le fil au sein de la limaille d'un métal autre que le fer, et il reconnut que, dans ce cas, aucune parcelle métallique ne restait adhérente. Le fluide libre n'est donc pour rien dans l'action qui avait été d'abord observée, et le phénomène en question était bien dû à l'état dynamique de l'électricité.

921. **Aimantation par les courants.** — Arago reconnut également que, si l'on met un courant en croix avec une aiguille d'acier non aimantée, il se forme un pôle austral à la gauche du courant, si bien que l'aimant nouveau et le courant sont dans la position relative qu'ils auraient occupée après une expérience d'Œrsted, répétée selon le mode ordinaire.

Comme l'expérience d'Arago ne réussit bien que si le courant est très-énergique, une idée très-simple se présentait naturellement à l'esprit des expérimentateurs : ne devait-on pas engendrer une aimantation aussi forte de l'aiguille d'acier en se servant d'un courant peu intense, à la condition qu'on accroîtrait son action de la même manière que dans le galvanomètre multiplicateur? En un mot, l'aiguille à aimanter placée dans l'intérieur du cadre du galvanomètre et mise en croix avec la direction du courant qui parcourt le fil de cet instrument, ne devait-elle pas s'aimanter tout aussi bien que sous l'influence d'un courant très-énergique? Les raisonnements que nous avons faits en développant la théorie du galvanomètre,

s'appliquent ici sans la moindre modification, et prouvent que tous les courants doivent agir pour faire naître un pôle austral à la même extrémité de l'aiguille.

922. En réalité, Ampère, qui eut le premier l'idée de cette tentative, ne se servit pas du cadre dont nous venons de parler, mais il employa une disposition préférable dans la pratique. Un fil fut enroulé en hélice sur un tube de verre creux AB (*fig.* 388) de petit diamètre, au milieu duquel on plaça l'aiguille d'acier. Les tours de l'hélice enveloppaient ainsi de très-près l'aiguille, qui, dans ces conditions, s'aimanta plus fortement qu'elle ne l'eût fait si elle avait été placée au centre du multiplicateur. Le sens de l'aimantation, qui prend naissance, est du reste facile à prévoir quand on connaît le sens du courant. Il suffit de s'appuyer sur ce principe déjà indiqué que le pôle austral se développe toujours à la gauche du courant. Dans le cas particulier de la figure, la gauche du courant est celle même du lecteur : c'est donc de ce côté A que se formera le pôle austral. Dans tout autre cas, quel que soit le sens de l'enroulement du fil, que l'hélice soit, comme disent les mathématiciens, ou *dextrorsum* ou *sinistrorsum*, il n'y a pas à s'en inquiéter : ce qu'il faut regarder, c'est le sens du courant; ce qu'il faut déterminer, c'est la gauche du spectateur placé dans la position indiquée par Ampère.



Fig. 388.

923. **Points conséquents.** — Rien n'est plus facile que de produire, par cette méthode, des points conséquents; il suffit d'enrouler le fil sur le même tube, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, afin que le courant change de sens plusieurs fois. La figure 389 représente une hélice disposée de manière à produire un point conséquent au milieu A de l'aiguille. On voit, en effet, que le courant, qui entre par l'extrémité B du fil, tourne d'abord sa gauche du côté A, tandis qu'arrivé en A il change de sens, sa gauche est placée en sens inverse, et par suite tournée encore vers A. Les actions des deux parties de l'hélice agissent alors pour faire naître un pôle austral au milieu de l'aiguille; l'expérience montre en effet que la polarité s'établit comme l'indique la figure : il apparaît à chaque bout un pôle boréal, et au milieu un pôle austral.



Fig. 389.

924. **Aimantation du fer doux.** — Un morceau de fer doux introduit dans l'intérieur d'une hélice formée par un fil conducteur acquiert, sous l'influence d'un courant, la même polarité magnétique que l'acier. Mais l'aimantation, au lieu d'être permanente comme dans cette dernière sub-

stance, est tout à fait momentanée; elle ne persiste que pendant la durée du passage du courant. Dès que le courant cesse, toute trace de magnétisme libre disparaît; de même, aussitôt que le fer doux est retiré de l'hélice, il ne donne plus aucun signe d'aimantation. Il est nécessaire toutefois, pour que le phénomène de désaimantation subite se manifeste, que le fer doux soit d'une excellente fabrication. Quand il est un peu carburé, il conserve assez longtemps une certaine quantité de magnétisme libre qu'on nomme dans ce cas *magnétisme rémanent*.

925. **Électro-aimant.** — Cette propriété du fer doux, de s'aimanter et de se désaimanter par le fait du passage et de la suppression d'un courant, a été appliquée à un grand nombre d'usages. Habituellement, le fil de cuivre revêtu de soie qui conduit le courant est enroulé directement sur le barreau de fer. S'il est assez long pour faire de 1 500 à 2 000 tours, il produit, quand le courant passe, une aimantation momentanée, incomparablement plus énergique que celle que nous avons vue se manifester dans les aimants ordinaires.

En général, on donne à ces appareils, que l'on appelle *électro-aimants*, la forme dite en fer à cheval. Quelquefois, le barreau de fer est recourbé et ses deux branches sont disposées parallèlement l'une à l'autre; mais le plus souvent il est formé de trois pièces distinctes; l'une d'elles, rectiligne et transversale, réunit les deux branches parallèles. Le fil métallique, recouvert de soie, est enroulé d'abord sur une des branches, puis, quand il a fait le nombre de tours voulu, il passe sur l'autre sans envelopper la partie intermédiaire. Il continue à s'enrouler sur la seconde branche dans un tel sens, que la nouvelle hélice formée soit comme la continuation de la première, et que le courant circulant dans le fil agisse d'accord dans toutes ses parties pour faire naître un pôle austral à l'un des bouts du barreau qu'on suppose alors redressé, et un pôle boréal à l'autre. Cette condition se trouve remplie en adoptant la disposition de la figure 390, qui représente un électro-aimant, sur les branches duquel nous n'avons dessiné qu'un petit nombre de tours, afin de bien faire voir la disposition indiquée. On remarquera que le fil, en se rendant d'une branche à l'autre, croise l'intervalle qui est libre entre elles.

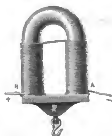


Fig. 390.

La figure 391 représente un électro-aimant analogue à ceux que l'on emploie d'habitude. En contact avec cet électro-aimant se trouve une armature de fer doux, portant un plateau. Lorsqu'on fait intervenir le courant d'une forte pile, l'aimantation est si puissante, que l'électro-aimant peut supporter plusieurs centaines de kilogrammes, et dès que le courant

est interrompu, le contact de fer doux tombe, et la charge est immédiatement abandonnée.

925 *bis*. **Magnétisme et diamagnétisme.** — Au moyen des aimants puissants que l'électricité peut produire, il a été possible de reconnaître les propriétés magnétiques de diverses substances sur lesquelles l'influence des aimants ordinaires était trop faible pour qu'on pût la constater autrefois. Jusqu'ici nous n'avons signalé que le magnétisme du fer, du nickel, du cobalt et du manganèse. Mais d'autres métaux, tels que le platine, sont aussi attirables par l'aimant. Une aiguille de platine suspendue entre les pôles A et B de l'électro-aimant (*fig.* 391) se fixe dans la direction de ces pôles. Il en est de même de plusieurs autres substances métalliques.

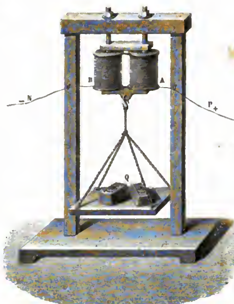


Fig. 391.

Un autre fait intéressant et tout à fait imprévu s'est offert à Faraday : certains corps sont repoussés par les aimants. on les distingue par le nom de substances *diamagnétiques ;* ce sont : le bismuth, l'antimoine, le zinc, l'étain, le plomb, l'argent, le cuivre, l'or, le soufre, le phosphore, le charbon et un grand nombre d'autres. Une aiguille de ces substances suspendue entre les pôles de l'électro-aimant se dirige perpendiculairement à la ligne des pôles. Les liquides mêmes, les gaz sont magnétiques ou diamagnétiques, la fumée d'une bougie que l'on vient d'éteindre est repoussée par l'électro-aimant. Un liquide posé sur les pôles de l'électro-aimant AB renversé se soulève dans la capsule qui le porte.

926. **Emploi des électro-aimants comme moteurs.** — De même que la vapeur met en mouvement le piston sur lequel sa pression s'exerce, de même un électro-aimant, dans le fil duquel un courant circule, peut imprimer un mouvement à un contact de fer doux placé à distance. Puis le courant étant interrompu dès que le contact aura fourni toute sa course possible, une action contraire, celle d'un ressort antagoniste ou d'un

second électro-aimant, le ramènera sans peine à sa position primitive : une série d'aimantations et de désaimantations alternatives produira donc un mouvement de va-et-vient facile à transformer selon les besoins de l'industrie. Il sera possible aussi, par des dispositions appropriées, d'obtenir une machine rotative.

927. **Machine de Page.** — Parmi les machines de ce genre qui ont été construites, nous citerons celle de Page. Elle se compose de deux électro-aimants B et B′ (*fig.* 392) formés par des cylindres creux de fer doux, sur chacun desquels s'enroule un fil de cuivre revêtu de soie pour isoler les spires. Une bielle de cuivre T, qui s'adapte à la manivelle M, porte deux barreaux de fer doux F et F′, qui peuvent pénétrer alternativement, l'un dans l'intérieur de l'électro-aimant B, l'autre dans l'intérieur de l'électro-aimant B′.



Fig. 392.

Lorsque l'hélice B est parcourue par le courant, l'hélice B′ n'est pas en communication avec la pile, et le fer doux F, qui se trouve alors en dehors de l'électro-aimant actif, est seul attiré et pénètre à l'intérieur de l'hélice; la manivelle commence son mouvement. Mais aussitôt que le fer doux a pénétré dans l'hélice, cette hélice cesse d'être parcourue par le courant qui passe à ce moment dans le fil B′; c'est F′ qui est alors attiré, et la bielle FF′ prend un mouvement en sens contraire. La roue doit donc être animée d'un mouvement de rotation continu. On comprend que les passages alternatifs du courant dans les deux bobines puissent être facilement déterminés en temps utile par la machine elle-même, comme cela a lieu pour le mouvement alternatif des tiroirs dans les machines à vapeur (583).

928. **Machine de M. Froment.** — M. Froment a construit une machine rotative, qui se compose d'une roue, sur la circonférence de laquelle sont fixées des plaques de fer doux situées à égale distance les unes des autres. A l'entour de la roue, et ne la touchant pas, sont disposés des électro-aimants dont les surfaces polaires paraissent former par leur ensemble un cylindre concentrique à la roue. Ces électro-aimants sont égaux en nombre à celui des armatures de fer doux.

La machine étant en mouvement, le courant circule dans les électro-aimants lorsque chaque armature se trouve voisine de l'électro-aimant qui lui correspond; l'aimantation produite donne naissance à un ensemble de forces motrices qui continuent le mouvement de la machine. Mais le

courant se trouve brusquement interrompu aussitôt que les armatures sont en regard des électro-aimants. La roue cependant continue à tourner en vertu de la vitesse acquise, et le courant se rétablit lorsque la rotation a amené les plaques de fer doux dans le voisinage de nouveaux électro-aimants. C'est la machine elle-même qui établit ou rompt, quand il le faut, les communications avec la pile.

929. **Chaleur consommée par le travail des électro-moteurs.** — Le travail, que ces machines exécutent, prend sa source dans les réactions chimiques qui engendrent le courant, et la chaleur, mise en liberté par ces réactions, se consomme à mesure que le travail s'accomplit. A un travail de 430 kilogrammètres correspond la dépense d'une unité de chaleur. Ce résultat a été établi par des expériences directes de M. Favre. Deux calorimètres, semblables à celui de la figure 393, reçoivent dans leur moufle M, l'un une pile, l'autre une machine électro-magnétique qui sont en rapport par des fils

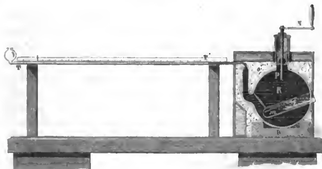


Fig. 393.

extérieurs assez gros pour ne pas s'échauffer. Quand le courant fait mouvoir la machine sans qu'il y ait aucun poids soulevé par elle, la chaleur totale, donnée par la dissolution du zinc, se retrouve tout entière dans les deux calorimètres sans aucune perte, à savoir 18 unités par équivalent de zinc dissous; mais dès que la machine, en tournant, fait monter un poids, la quantité de chaleur dégagée diminue, et la perte est de 1 calorie pour environ 430 kilogrammètres de travail exécuté. Donc, l'équivalent mécanique de la chaleur, se retrouve encore ici exprimé par le nombre 430, comme dans les expériences de M. Joule décrites au § 494.

930. **Appréciation de ces machines.** — Ces résultats permettent d'apprécier nettement les machines électro-motrices au point de vue industriel, et de dire qu'au prix de revient de l'électricité, une force même coûteuse est encore plus économique que celle qui provient du passage d'un courant. Compare-t-on les machines à vapeur et les machines élec-

tro-magnétiques, on peut exprimer très-simplement leur valeur relative en disant : qu'en définitive le travail dû à l'électricité a pour origine la combustion du zinc, tandis que celui qu'engendre la vapeur d'eau provient de la combustion du charbon. Or, en tenant compte des quantités des deux combustibles qu'on consomme pour créer une même quantité de travail, il n'est pas douteux qu'il n'y ait une économie considérable à s'en tenir encore à l'emploi de la houille.

En outre, jusqu'à ce jour, les machines électro-magnétiques sont si lourdes, que pour obtenir la force dite d'un cheval-vapeur, on serait obligé d'employer un appareil pesant 800 kilogrammes, poids effrayant et qui, dans un grand nombre de circonstances, empêcherait d'employer l'électricité comme moteur, même si elle était à bas prix.

Les machines dont nous discutons la valeur, ont un grand intérêt au point de vue théorique ; elles apportent une preuve de plus à l'appui de cette idée d'une corrélation intime des forces physiques en montrant la conversion de l'électricité en travail mécanique. Quant à leur importance pratique, elle est bien restreinte; elles ne sont guère utilisées que dans les cas, peu nombreux, où il s'agit de faire marcher, avec une grande régularité, des instruments de précision exigeant de faibles efforts. M. Froment dans ses ateliers a su tirer ingénieusement parti de ces machines électro-magnétiques qu'il construit avec une grande habileté; mais ce n'est pas à cause de leur puissance qu'il les emploie, c'est en raison de la vitesse et de la régularité de leur marche. Dans l'état actuel de la science, on peut affirmer que c'est perdre son temps que de vouloir convertir l'électricité en un moteur d'une grande puissance; pour qu'elle pût être utilisée avec profit, il faudrait que le courant fût produit moyennant une dépense vingt-cinq à trente fois moins considérable que celle qui est nécessaire aujourd'hui.

TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES (*).

931. Le courant, qui est un moteur si médiocre quand on veut lui faire exécuter un travail puissant, présente dans des circonstances spéciales des avantages qui n'appartiennent à aucune autre force motrice. A plusieurs centaines de kilomètres de la pile, il peut mettre en mouvement certains mécanismes, et un simple fil suffit pour transporter au loin la force produite à l'endroit même où l'électricité s'élabore. Il y a mieux : comme la force est transmise avec une vitesse considérable, le courant voltaïque est

(*) Il est difficile de dire le nom de l'inventeur du télégraphe. Sœmmering est le premier qui ait pensé à se servir du courant pour la transmission des dépêches; il utilisait les décompositions chimiques. Ampère vint ensuite et proposa le galvanomètre. Wheatstone, Steinheil ont, les premiers, construit des télégraphes qui fonctionnaient régulièrement.

éminemment propre à transporter avec promptitude tels signaux qu'il plaira d'expédier. Les appareils construits dans ce but se nomment *télégraphes électriques*.

L'ensemble d'une ligne télégraphique comprend : 1° une pile ; 2° des fils métalliques communiquant avec les deux stations ; 3° un appareil destiné à recevoir les signaux et que l'on nomme *récepteur* ; 4° un appareil mis en mouvement par l'employé qui est chargé de transmettre les dépêches, c'est le *manipulateur*.

932. **Principe du télégraphe électrique.** — Le récepteur des télégraphes électriques employés en France, se compose d'un électro-aimant E (*fig.* 394) et d'une armature de fer doux A qui est tenue par un ressort antagoniste R à une petite distance des pôles de l'électro-aimant. A l'une des stations, se trouve une pile dont le courant peut être conduit par les fils PF et NF' jusqu'à l'électro-aimant placé à l'autre station. La pile par exemple est à Paris, et l'électro-aimant à Marseille.



Fig 394.

Lorsque le courant passe, l'armature est attirée et s'avance malgré le ressort antagoniste, qui est trop faible pour s'opposer à ce mouvement. Si à Paris on vient à rompre le courant (et il suffit pour cela de détacher du pôle P le fil PF qui y était uni), l'aimantation cesse, et le fer doux sollicité par le ressort antagoniste s'écarte de l'électro-aimant. Un nouveau passage et une nouvelle interruption du courant, reproduiront les deux mêmes mouvements à la volonté de l'opérateur. Il est donc facile d'imprimer un va-et-vient continu à une armature de fer doux placée à distance, et ces mouvements alternatifs, convenablement combinés en durée et en nombre, pourront donner tous les signaux, comme nous allons le montrer un peu plus loin.

933. **Communication avec la terre.** — Mais, avant d'entrer dans les détails de construction, une nouvelle idée est importante à noter dès à présent. L'expérience a montré que pour faire circuler le courant dans l'électro-aimant, il n'est pas nécessaire d'employer deux fils ; un seul suffit. Enlevons en effet le fil NF' et mettons en communication avec la terre les points F' et N de la pile et de l'électro-aimant ainsi séparés,



Fig. 395.

l'appareil fonctionnera tout aussi bien qu'auparavant : le fil PF employé seul permet au courant de circuler dans l'électro-aimant. Il est aisé de s'en rendre compte. Le pôle positif de la pile est en communication avec le sol par l'intermédiaire du fil de ligne PF et du fil FF' de l'électro-aimant. L'électricité, développée à ce pôle, provoque donc un courant dans le fil, comme le fait toute source d'électricité le long du conducteur qui la met en rapport avec la terre (681). L'électricité positive, que la pile en activité fait affluer toujours en P, détermine un mouvement continu d'électricité positive qui se dirige de ce pôle vers T', et par suite un mouvement d'électricité négative en sens inverse, de sorte qu'un courant se propage suivant P, F, F', T'. Ce résultat est important dans la pratique par l'économie qui en résulte : le fil NF', qui devait avoir la longueur de la ligne télégraphique, se trouve remplacé par quelques mètres de fils F'T' et NT. Mais il faut que T et T' soient en communication intime par de larges plaques avec un sol constamment humide ou mieux encore avec l'eau d'un puits.

934. Télégraphe de Morse. — Récepteur. — L'électro-aimant E du

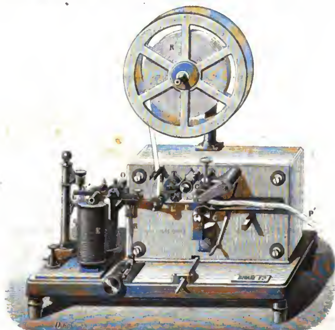


Fig. 396.

récepteur de Morse est vertical, et l'armature A est fixée à un levier LL', qui est mobile autour d'un axe horizontal O, et auquel s'attache le ressort

antagoniste R. L'extrémité L de ce levier se trouve limitée dans ses mouvements par les pointes de deux vis V, V', entre lesquelles elle est comprise; l'autre extrémité L', appuyée contre un ruban de papier PP', se relève quand le courant passe et que l'armature A est attirée; en se relevant elle met le ruban PP' en contact avec la tranche d'une roue ou *molette* M, toujours chargée d'encre grasse qui alors laisse une trace noire sur le papier. Mais le papier n'est pas immobile; il reçoit un mouvement à l'aide de deux cylindres rugueux C et C', entre lesquels il est serré et qui tournent par un mouvement d'horlogerie : entraîné par ce mouvement, il avance avec une vitesse constante. D'après cela, si le courant persiste pendant quelque temps, une longueur notable de la bande de papier passe en frottant contre la molette et un trait noir de 2 ou 3 millimètres se trouve marqué. Si, au contraire, le courant ne dure que pendant un temps très-court, le trait marqué aura une moindre longueur, il deviendra comparable à un point. L'employé chargé de transmettre la dépêche pourra donc, en envoyant le courant dans le fil de la ligne, pendant des intervalles de temps convenables, faire tracer, à son gré, par l'armature de l'électro-aimant placé à la station d'arrivée, des lignes noires de différentes longueurs, et de plus espacer ces lignes comme il le jugera à propos. Dans la pratique, on n'emploie comme éléments des signaux que deux longueurs différentes : le *point* et la *barre;* le premier, le *point*, se représente par un petit trait qui est le tiers de la barre en longueur. — Voici le tableau des signaux qui expriment les lettres dans les correspondances internationales auxquelles le télégraphe de Morse est employé dans toute l'Europe :

Tableau :

APPAREIL MORSE (SIGNAUX).

LETTRES.	SIGNES.	LETTRES.	SIGNES.
a	· —	*r*	· — ·
ä	· — · —	*s*	· · ·
b	— · · ·	*t*	—
c	— · — ·	*u*	· · —
ch	— — — —	*ü*	· · — —
d	— · ·	*v*	· · · —
e	·	*w*	· — —
é	· · — · ·	*x*	— · · —
f	· · — ·	*y*	— · — —
g	— — ·	*z*	— — · ·
h	· · · ·	CHIFFRES.	SIGNES.
i	· ·	1	· — — — —
j	· — — —	2	· · — — —
k	— · —	3	· · · — —
l	· — · ·	4	· · · · —
m	— —	5	· · · · ·
n	— ·	6	— · · · ·
ñ	— — · — —	7	— — · · ·
o	— — —	8	— — — · ·
ö	— — — ·	9	— — — — ·
p	· — — ·	0	— — — — —
q	— — · —		

Pour rendre la transmission lisible, il faut espacer à peu près également deux éléments d'un même signal, espacer un peu plus, mais toujours par des intervalles égaux entre eux, les différentes lettres d'un même mot; enfin il faut, comme dans l'écriture usuelle, bien isoler chaque mot. On



Fig. 397.

peut voir (*fig.* 397), comment le mot *dépêche* se trouve transcrit sur une

bande de papier en signes télégraphiques. L'imprimeur a reproduit ici exactement les traits avec leur longueur et leur espacement, tels, en un mot, que l'appareil télégraphique les a lui-même tracés.

Pendant longtemps, on s'était contenté d'inscrire les traits sur la bande de papier avec une pointe mousse placée en L'. On obtenait, de cette manière, une sorte de gaufrage qui rendait la dépêche souvent fort difficile à lire et qui se trouvait bientôt effacé par le frottement. Aujourd'hui, dans les stations principales, le récepteur est muni de cet appareil à encrage que nous avons décrit et dont l'invention est due aux frères Digney. Cette modification introduite dans le télégraphe de Morse est très-avantageuse : la dépêche est toujours lisible, elle peut être conservée indéfiniment sans subir d'altération et, en outre, la dépense de force nécessaire pour l'encrage est incomparablement moindre que celle qu'exigeait le gaufrage du papier.

935. **Manipulateur de l'appareil de Morse.** — Il résulte de ce que nous disions tout à l'heure, que l'employé, qui transmet la dépêche, doit mettre le fil télégraphique en communication avec l'un des rhéophores de la pile, puis il doit interrompre la communication, et de plus le passage et la suppression du courant doivent être effectués avec une grande régularité; on y est parvenu au moyen d'un appareil simple nommé le ***manipulateur***.

Dans ce manipulateur, l'un des rhéophores P est en communication avec une petite colonne E que nous appellerons l'*enclume;* le fil télégraphique est réuni avec le levier AB, qu'un ressort R écarte de l'enclume. Dans ces conditions, le courant ne passe pas. Mais vient-on à appuyer sur la poignée A, le levier s'abaisse, un contact métallique s'établit entre l'enclume et ce levier, et dès lors le courant peut arriver à l'électro-aimant d'une station éloignée. Dès que l'on cesse d'appuyer, le courant est interrompu, car le ressort R agit seul. En quelques jours d'exercice, un employé parvient à transmettre lisiblement une dépêche, et avec de l'exercice, on arrive à produire des signaux aussi nets que ceux qui ont été représentés sur notre tableau.

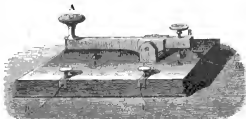


Fig. 398.

Tout manipulateur est muni en outre d'une seconde colonne ou enclume E' sur laquelle le levier AB s'appuie quand le courant ne passe pas. Cette colonne E' est nécessaire pour l'installation d'un poste télégraphique, comme nous allons le montrer dans le paragraphe qui suit.

936. **Installation d'un poste.** — Un poste est installé de manière à

pouvoir transmettre et recevoir les dépêches; il doit avoir, par conséquent, un manipulateur et un récepteur, et le poste auquel il est relié doit satisfaire aux mêmes exigences. Enfin, il faut qu'à un instant quelconque, une dépêche puisse être transmise, soit dans un sens, soit dans l'autre. Tout d'abord, on pourrait croire que cette double transmission exige deux fils, car il faut pouvoir réunir chacun des manipulateurs au récepteur qu'il doit faire marcher; mais il n'en est rien : un seul fil suffit. La figure 399 montre comment les deux postes sont en rapport. P_1 et P_2 représentent les piles, M_1 et M_2 les manipulateurs, R_1 et R_2 les récepteurs; enfin, T_1 et T_2 les fils qui vont à la terre. Les deux appareils étant au repos, les deux récepteurs communiquent tous deux avec le

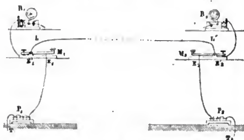


Fig. 399.

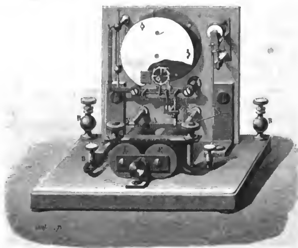


Fig. 400.

fil de ligne par les colonnes E'_1 et E'_2 qui sont les analogues de celle qui a été désignée par E' dans le paragraphe précédent; et si le manipulateur M_1 est baissé, le récepteur R_2 marche. De la première station, on a donc attaqué la seconde, et inversement, de la seconde, on pourra attaquer la première.

937. **Télégraphe de Bréguet.** — L'électro-aimant du télégraphe Bréguet est horizontal : il se trouve représenté en E (*fig.* 400) ; l'armature A, mobile autour d'un axe horizontal OO', porte un levier L auquel est fixé le ressort antagoniste R. Les oscillations du levier, transmises à une palette d'échappement P, règlent la marche d'une aiguille mobile sur un cadran (*fig.* 401) où se trouvent marquées les 25 lettres de l'alphabet, plus une croix. Sans

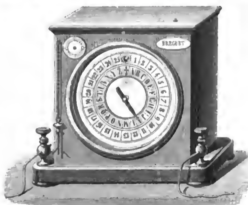


Fig. 401.

cette palette, l'aiguille, sollicitée sans relâche par un mouvement d'horlogerie, passerait successivement sur chacune des lettres sans se fixer sur aucune. Mais par l'action de la palette, elle peut être mise au repos. Pour cela, à l'axe qui la porte, sont adaptées, côte à côte, deux roues K et K' (*fig.* 401 et 402), dites *roues à rochet*, qui sont armées chacune de 13 dents obliques et disposées de telle sorte que les dents de la première alternent avec celles de la seconde. En tout, 26 dents se succèdent donc, et d'une dent à la dent la plus voisine, on compte un vingt-sixième de tour. La palette P, intercalée entre les dents d'une roue, empêche le mouvement, car une dent butte contre elle; si elle vient à passer d'une roue à l'autre, la dent en prise

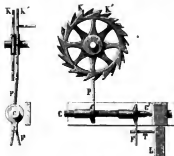


Fig. 402.

cesse de l'être, la rotation commence, et dure jusqu'à ce qu'une dent de la seconde roue butte de nouveau, ce qui a lieu après un vingt-sixième de tour. Donc, à chaque oscillation, l'aiguille avancera d'un vingt-sixième de tour, c'est-à-dire d'une lettre.

L'axe CC' prend d'ailleurs son mouvement oscillatoire à celui du levier L, au moyen d'une espèce de manivelle qui se compose d'une fourchette renversée F, dont la pointe est fixée à l'axe CC', et entre les branches de laquelle passe une tige de transmission T attachée au levier L.

L'aiguille étant sur la croix, si l'employé, placé à la station de départ, fait passer le courant, une oscillation a lieu, l'aiguille vient sur la lettre A; quand le courant est ensuite interrompu, une oscillation en sens contraire se produit et amène l'aiguille sur la lettre B : ainsi, chaque fermeture ou chaque interruption du courant fait avancer l'aiguille d'une lettre. L'employé, qui envoie la dépêche, peut, en comptant le nombre d'émissions et d'interruptions qu'il produit, savoir si l'aiguille se trouve sur la lettre qu'il veut transmettre. Quand elle y est arrivée, il n'a qu'à la laisser stationner dans cette position pendant le temps suffisant pour que son intentión soit bien marquée et comprise; puis il devra provoquer le nombre d'oscillations convenable pour que l'aiguille passe de cette lettre à la seconde lettre qui doit être envoyée, et ainsi de suite : la dépêche sera transmise.

938. **Manipulateur.** — Les calculs, que l'on serait obligé de faire à la station de départ, ne manqueraient pas d'entraîner des erreurs continuelles. Le manipulateur compte comme de lui-même le nombre des interruptions et des fermetures du courant. Il se compose d'un levier horizontal AB (*fig.* 403), oscillant autour d'un axe vertical passant par le point O. Ce levier, par son extrémité B, est en communication constante avec le fil de la ligne télégraphique L ; et son extrémité A se trouve à une petite distance d'une masse métallique P', qui communique avec le pôle P de la pile. Quand le levier oscille et que A vient toucher P', comme B d'ailleurs ne cesse pas d'être en communication avec le fil de ligne, le courant passe de P' en A, de A en B et de B en L ou en sens inverse selon le pôle qui est en rapport avec P'. Mais quand, par suite de l'oscillation du levier, A est éloigné de P', la communication est interrompue, le courant ne passe plus.



Fig. 403.

Le mouvement d'oscillation est donné au levier par une roue métallique que l'on fait tourner au moyen de la manivelle M. Cette roue creusée d'une rainure sinueuse qui présente treize ondulations dans un sens, et treize en sens contraire, imprime un mouvement de va-et-vient à une che-

ville qui est fixée au point B du levier AB et qui pénètre dans la rainure. Le levier oscille donc, et la communication de la pile avec le fil de la ligne se trouve alternativement établie et interrompue. Au-dessus de cette roue un cadran porte les 25 lettres de l'alphabet et la croix. A l'état de repos, la manivelle est sur la croix, l'aiguille du récepteur se trouve au même signe : l'extrémité A du levier n'est point en contact avec P', le courant ne passe pas.

Si l'on veut transmettre une dépêche, on déplace la manivelle qui vient sur la lettre A lorsque la roue a fait un vingt-sixième de tour; la tige fixée en B n'est plus alors logée dans un creux de la rainure ondulée, mais elle se trouve dans une partie saillante; le levier a pris, par suite, une position nouvelle, et le courant passe, à cause du contact qui s'est établi entre A et P'. L'aiguille du récepteur vient sur la lettre A du cadran et elle y restera, tant que la manivelle demeurera immobile. Si la manivelle est portée sur la lettre B, la tige se logera dans un creux, l'extrémité A du levier se trouvera éloignée de P', et le courant sera interrompu : l'aiguille du récepteur indiquera la lettre B. Chaque mouvement de la manivelle se répète ainsi sur le récepteur, et l'employé qui la manœuvre n'a qu'à lire sur le cadran de son manipulateur, il y voit les signaux qui se font sur le récepteur avec lequel il correspond.

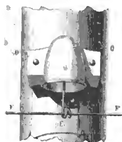
939. **Avantages des systèmes décrits.** — Le télégraphe de Bréguet a l'avantage de transmettre comme signaux les lettres ordinaires de l'alphabet ; il ne nécessite aucune étude préalable, et c'est cette raison qui l'a fait adopter par les compagnies de chemins de fer.

Dans le télégraphe Morse, au contraire, on fait usage d'un alphabet conventionnel spécial. Cet appareil a été préféré par les administrations télégraphiques, et est aujourd'hui employé pour les correspondances internationales dans toute l'Europe, parce qu'il permet d'arriver à une plus grande rapidité dans les transmissions, mais surtout parce qu'il laisse une trace écrite des dépêches.

940. **Autres espèces de télégraphes.** — Il existe un grand nombre d'autres télégraphes. Un télégraphe anglais, inventé par Wheatstone, utilise simplement les indications de deux galvanomètres à aiguilles verticales : le sens et le nombre des déviations forment les éléments simples des signaux. Les télégraphes de Bain et de Pouget écrivent les dépêches comme celui de Morse ; mais les signaux sont produits par des décompositions électro-chimiques : jusqu'ici ces appareils n'ont pas pu être bien réglés. Le papier, sur lequel les points et les traits s'inscrivent en bleu par suite d'une décomposition chimique, devrait être entretenu dans un état permanent d'humidité; et cette condition est difficile à réaliser. Il existe, en outre, d'autres appareils qui impriment les dépêches en caractères typographiques ordinaires. Enfin, on est parvenu à construire des télégraphes autographiques,

c'est-à-dire qui reproduisent exactement l'écriture d'un individu, sa signature; qui, en un mot, donnent à distance le calque d'un dessin quelconque.

941. **Fil de ligne.** — Le fil unique, qui sert à la communication du manipulateur et du récepteur, doit être isolé. A cet effet, on le fait passer quelquefois sous terre, en le préservant de tout contact par des enveloppes isolantes, formées avec de la gutta-percha, du caoutchouc ou du bitume. Le plus souvent, le fil est soutenu au-dessus du sol par des poteaux. Mais ces poteaux deviennent bons conducteurs dès qu'ils sont mouillés; il faut donc que le fil ne les touche point. On le soutient par des crochets C (*fig.* 404) implantés au fond de cloches en porcelaine qui sont renversées et fixées par deux oreilles. La porcelaine conduit mal l'électricité, et d'ailleurs les cloches sont difficilement mouillées à l'intérieur : elles forment un isolement suffisant dans la pratique.


Fig. 404.

Quand le fil passe sous un tunnel et qu'il est exposé à en toucher les parois, on le recouvre de gutta-percha.

942. **Câble sous-marin.** — Si le fil doit relier deux stations séparées par un bras de mer, on le fait descendre au fond de l'eau, mais alors une substance isolante le recouvre et empêche le contact de l'eau conductrice; généralement c'est la gutta-percha que l'on emploie. Le câble sous-marin contient plusieurs fils : quatre en général, tels que B (*fig.* 405), qui sont isolés l'un de l'autre et qui peuvent se suppléer mutuellement. Enfin, pour parer aux accidents qui pourraient rompre le câble, on le protége en entourant la gutta-percha d'une corde métallique A, qui s'appelle l'*armature du câble*. Certains câbles n'ont autour de la gutta-percha qu'une corde de chanvre; l'armature métallique n'existe alors que près des côtes.

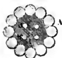



Fig. 405.

Les câbles sous-marins ont un très-grand inconvénient, qui a empêché jusqu'à ce jour d'établir des communications régulières entre les stations très-éloignées; dans les conditions où ils se trouvent, ils forment de véritables condensateurs dont le fil télégraphique constitue l'armure intérieure, tandis que la corde métallique et l'eau en sont l'armure extérieure. L'électricité, au lieu de cheminer rapidement le long du fil, se trouve arrêtée dans sa marche par des phénomènes de condensation : elle agit sur le fluide neutre extérieur qui se décompose et laisse s'accumuler contre la

lame isolante de l'électricité de nom contraire ; celle-ci réagit à son tour sur le fluide du fil, comme nous l'avons vu dans la théorie de la bouteille de Leyde.

943. **Perturbations.** — Les lignes télégraphiques sont sujettes à des perturbations assez nombreuses. L'emploi de la terre comme conducteur fait que les fils sont sans cesse parcourus par des courants terrestres, très-faibles d'ordinaire, il est vrai, mais qui prennent souvent assez d'intensité (au moment des aurores boréales, par exemple) pour entraver complétement le travail. Ainsi, dans le mois de septembre de 1860, pendant trois jours les transmissions ordinaires ont été impossibles sur plusieurs lignes, et les perturbations étaient bien dues à l'emploi de la terre comme conducteur, car dans les circuits exclusivement métalliques, les dépêches marchaient très-bien.

L'électricité atmosphérique produit aussi, dans les fils, des courants qui, en temps d'orage, détruiraient très-souvent les bobines des électro-aimants, si l'on n'avait soin de protéger ces derniers par des moyens spéciaux qui remplissent bien leur but, mais qui souvent rendent encore impossible l'envoi des dépêches. Enfin, il se produit souvent des *dérivations* du courant soit vers la terre, par suite d'un isolement imparfait du fil, notamment dans les temps de pluie et de brouillard, soit vers d'autres fils qui se mêlent au premier lorsque, disposés en assez grand nombre sur les mêmes supports, ils se sont détendus par leur propre poids, ou par l'agitation que le vent leur communique.

CHAPITRE VI

ACTION DES COURANTS SUR LES COURANTS.

944. **Historique.** — A peine l'expérience d'Œrsted est-elle connue, qu'Ampère, avec une sagacité merveilleuse, voit de suite qu'il est légitime d'en conclure, que deux courants exercent l'un sur l'autre des actions mutuelles, qu'ils s'attirent ou se repoussent selon les positions relatives qu'ils occupent, selon la forme qu'ils affectent. Moins de six mois après la publication d'Œrsted, dans l'année 1820 elle-même, il présente à l'Académie des sciences de Paris un mémoire où se trouvent consignés la plupart des résultats que nous allons faire connaître. Pendant les années qui suivirent, il s'occupa de coordonner l'ensemble des phénomènes qu'il avait décou-

verts et de déterminer le sens et la grandeur des forces mises en jeu, d'abord dans les cas les plus simples, ensuite dans les circonstances où la forme des conducteurs rendait les calculs difficiles.

945. **Courant mobile.** — Les dispositions, données aux courants dans les chapitres qui précèdent, ne permettent pas de rendre manifestes leurs actions attractives ou répulsives. Deux fils, traversés chacun par un courant et posés l'un à côté de l'autre, ne prennent généralement aucun mouvement à cause de leur peu de mobilité. Ampère, persuadé toutefois que des actions s'exerçaient, inventa des dispositions qui rendirent les courants très-mobiles.

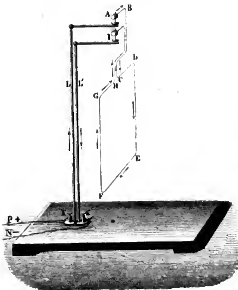


Fig. 406.

Parmi les appareils employés, nous choisirons celui que représente la figure 406. Il consiste en un rectangle formé par un fil de cuivre, dont les extrémités se redressent et se terminent en crochets plongeant dans de petites coupelles pleines de mercure. Le crochet supérieur A, terminé par une pointe d'acier, pose seul sur le fond de la coupelle qui lui correspond, et le rectangle, ainsi soutenu par un point unique, est très-mobile autour d'un axe vertical qui partage le rectangle en deux moitiés également pesantes. La mobilité est encore augmentée, parce que la pointe repose sur un petit disque de verre ou d'agate fixé au fond de la coupelle.

La coupelle supérieure est mise en rapport avec le pôle positif d'une pile, la coupelle inférieure avec le pôle négatif. Le courant circule dans le rectangle : il va de la coupelle au mercure, ensuite il se rend à la pointe, puis suit la route ABCDEFGHIK, et revient à la coupelle inférieure. La communication avec les pôles s'établit au moyen des pinces à vis K,K', fixées à la base des colonnes L, L' qui portent les coupelles.

945 *bis*. **Commutateur.** — Il est bon de pouvoir changer le sens du courant qui circule dans le rectangle; on y parvient aisément en intervertissant les fils de la pile et en les reliant le pôle positif avec K', le pôle négatif

avec K ; mais des appareils plus commodes, appelés *commutateurs*, rendent ce changement plus facile à exécuter. Déjà Ampère avait imaginé un commutateur ; depuis on en a inventé un grand nombre d'autres ; voici celui que M. Ruhmkorff construit de préférence. Deux bandes de métal V et V' (*fig.* 407), qui ne se touchent pas, sont appliquées sur toute la longueur d'un cylindre d'ivoire, chacune d'elles enveloppant un peu moins que la moitié du contour latéral de ce cylindre B qui peut tourner autour d'un axe métallique *ab* interrompu en son milieu.

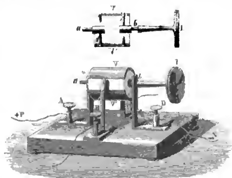


Fig. 407.

L'une de ces bandes communique par une vis *v* avec *b*, l'autre par la vis *v* avec *a*, et par un déplacement convenable autour de l'axe donné au moyen du bouton isolant I, toutes deux sont pressées par les ressorts de métal B et C.

Cet appareil se dispose de la façon suivante : *a* est mis en communication avec le pôle positif de la pile, *b* avec le pôle négatif, le ressort B avec K, le ressort C avec K' (945). Tourne-t-on le cylindre de sorte que V' touche le ressort B et que V touche le ressort C, le courant va suivant la route P*a*V'BK, circule le long du rectangle et revient en K'VC*b*N. Fait-on faire un demi-tour au cylindre, le courant passe de *a* en K', marche dans le rectangle en sens contraire du sens précédent et revient par K en N. Met-on l'appareil comme le montre la figure, le courant est interrompu, car les ressorts ne touchent plus les bandes métalliques.

946. Premiers phénomènes. — Avec le courant mobile décrit au § 945, on constate les phénomènes suivants, sur lesquels nous établirons, comme sur une base fondamentale, tout ce qui va suivre.

1° Les courants parallèles et dirigés dans le même sens s'attirent.

2° Les courants parallèles et dirigés en sens contraires se repoussent.

3° Deux courants, qui font un angle, s'attirent s'ils marchent tous les deux vers le sommet de l'angle, ou bien encore si tous deux s'éloignent de ce sommet.

4° Deux courants, qui font un angle, se repoussent, si l'un d'eux s'approche du sommet de l'angle et que l'autre s'en éloigne.

La figure 408 est la représentation des deux cas où la répulsion a lieu. La figure 408 *bis* met sous les yeux les trois cas où l'attraction se produit.

Pour les courants, qui font un angle, mais qui ne sont pas dans le même plan, les deux dernières propositions subsistent, à la condition de considérer, à la place du sommet de l'angle, la perpendiculaire commune aux deux directions des courants. Ainsi deux courants se repoussent quand l'un s'approche de la perpendiculaire commune et quand l'autre s'en éloigne.

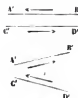


Fig. 408.

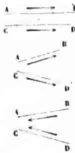


Fig. 408 *bis*.

947. **Démonstration expérimentale.** — Voici la démonstration de ces premiers phénomènes. Près du rectangle mobile abandonné d'abord à lui-même et arrivé au repos, par exemple vis-à-vis de la partie DE (*fig.* 409), on tend un autre courant, que l'on tient à la main, et l'on reconnaît sans difficulté la nature de l'action produite, suivant que ce nouveau courant, parallèle à l'un des côtés verticaux du rectangle mobile, est dirigé dans un sens ou dans l'autre. On rend les effets plus marqués en plaçant vis-à-vis de DE, au lieu d'un fil unique représentant le courant fixe, le côté XY d'un cadre sur lequel est enroulé plusieurs fois un fil métallique recouvert de soie, comme sur un galvanomètre. Tous les courants qui passent le long de XY vont dans le même sens, et de cette façon, l'action d'un simple courant, qui pourrait ne produire aucun mouvement appréciable de l'équipage mobile, si elle s'exerçait seule, devient très-sensible quand elle est multipliée. Dans l'exemple représenté par la figure, DE et XY marchent dans le même sens; il y a attraction.

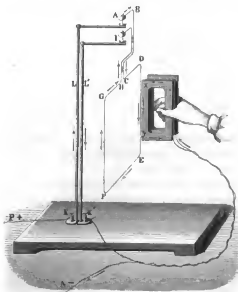


Fig. 409.

948. Les actions des courants qui font un angle se reconnaissent, en pla-

çant le cadre XY comme le montre la figure 409 *bis*. Le courant XY est horizontal et est rencontré par l'axe vertical autour duquel le cadre est mobile.

On remarquera que, dans l'un comme dans l'autre cas, une seule pile suffit pour produire les deux courants en action. Au lieu de réunir directement le pôle négatif avec K', on intercale entre eux le fil du cadre XY.

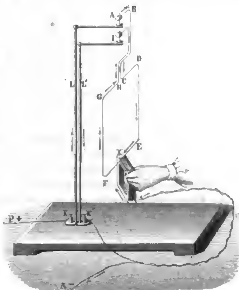


Fig. 409 *bis*.

949. **Autres résultats fondamentaux.** — 1° Deux parties d'un même courant parcourues en sens contraires par le flux électrique, exercent sur un courant extérieur des actions égales et contraires.

2° Un courant sinueux agit avec la même intensité que le courant rectiligne qu'il enveloppe, pourvu qu'en se contournant, il s'écarte peu de ce dernier.

Ces deux nouveaux principes, pour lesquels la vérification expérimentale paraîtrait, au premier abord, plus embarrassante que pour les quatre premiers, s'établissent au moyen du rectangle que nous avons déjà employé.

On présente à l'un de ses côtés verticaux un fil (*fig.* 410) recouvert de soie et plié de telle sorte que deux de ses parties se côtoient dans une certaine longueur. Dans ce fil, on fait circuler un courant qui monte selon AB et redescend selon BC. L'expérience fait voir que ces deux courants de sens contraires, ainsi associés, sont sans action sur le rectangle. L'immobilité du rectangle persiste si, au lieu de présenter seulement ABC, on enroule un très-grand nombre de fois sur le cadre d'un multiplicateur un double courant tel que le précédent, mais d'une très-grande longueur. Seulement pour cette dernière expérience il faudra procéder à l'enroulement avec le soin nécessaire pour que les deux parties du fil soient bien à égale distance du côté du rectangle dont on l'approche : résultat très-difficile à obtenir; aussi observe-t-on toujours un mouvement du courant mobile. Mais si l'on construit un grand nombre d'appareils avec lesquels on répète l'expérience, tantôt un effet se produit



Fig. 410.

dans un sens, tantôt un effet dans un autre : ce qui prouve que les mouvements observés ne résultent que de défauts inévitables de construction.



On démontre la seconde proposition en employant des dispositions semblables, seulement l'un des courants BC (*fig.* 411) tourne autour du premier AB en formant une sorte d'hélice. Le système de ces deux fils est enroulé sur le cadre d'un multiplicateur, et sous l'influence des deux courants de sens contraires, le rectangle reste immobile. Le courant sinueux agit donc comme un courant rectiligne, puisque, d'après l'expérience précédente, un courant rectiligne qui prendrait sa place et descendrait comme lui aurait équilibré l'action du courant ascendant AB.

Fig. 411.

Les résultats précédemment constatés nous donnent le pouvoir de déterminer par le raisonnement seul et à la manière des géomètres, les actions exercées par des courants de formes connues, du moins dans certaines circonstances de formes et de positions (*).

950. **Action d'un courant horizontal indéfini sur un courant horizontal limité et mobile autour d'un axe vertical.** — Soit XY (*fig.* 412) un courant fixe, horizontal et indéfini que le lecteur pourra supposer sur la page même du livre ; soit AB un courant horizontal, limité et mobile autour d'un axe vertical passant par le point A. Ce courant marche de A vers B, et il est d'une longueur telle que dans tous les mouvements, le point B reste toujours d'un même côté par rapport



Fig. 412.

(*) Parmi les conséquences, que l'on peut déduire des premiers phénomènes décrits, en voici une qui est souvent signalée :

Un fil unique plié en angle suivant des directions telles que A'B', C'D' (*fig.* 408) se trouve composé de deux parties qui se repoussent quand on fait entrer par l'extrémité B' un courant qui sort par l'autre extrémité D' ; et cela est exact quel que soit l'angle des deux directions : ainsi, quand on agrandit cet angle et qu'il est très-près d'être égal à deux angles droits, les deux courants se repoussent encore. On est alors conduit à penser qu'à la limite, quand l'angle sera augmenté au point que les deux directions soient dans le prolongement l'une de l'autre, il y aura encore répulsion. D'où l'on arrive à cette conclusion : Deux parties consécutives d'un même courant se repoussent.

Ampère donnait une expérience pour le démontrer ; mais nous nous abstenons de la décrire, parce qu'en réalité les courants, qui agissent dans l'expérience d'Ampère, sont des courants angulaires et non des courants qui cheminent dans la même direction.

à XY ; il est d'ailleurs contenu, soit dans le plan horizontal passant par XY, soit dans tout autre plan horizontal.

Dans la position actuelle, les deux courants sont parallèles et cheminent dans le même sens ; par conséquent ils s'attirent ; AB s'approchera donc de XY autant qu'il sera possible d'après la fixité du point A ; il tournera et prendra la position AB'.

Le courant étant en AB', prolongeons-le ; menons la perpendiculaire commune qui se projettera en H sur le plan du papier, et appliquons les propositions du § 946. Les deux courants AB' et HX s'approchent tous deux de la perpendiculaire commune : donc AB' est attiré par HX et sollicité à tourner autour de A dans le sens de la flèche F. Quant aux deux courants AB' et HY, l'un se dirige vers la perpendiculaire commune, l'autre s'en éloigne ; ces deux courants se repoussent. Le conducteur AB' sera repoussé loin de YH, par conséquent vers X, et cette répulsion agira pour produire, comme le fait aussi HX, le mouvement de B' dans le sens de la flèche F : il y aura donc rotation du courant mobile. Dans toute autre position de AB, l'action de XY, déterminée comme nous devons le faire, s'exerce toujours de manière à continuer le mouvement de rotation dans le même sens Ainsi la théorie nous dit d'avance ce que l'expérience doit montrer : une rotation continue de AB autour de l'axe vertical A.

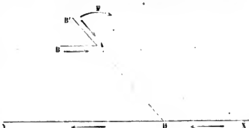


Fig. 413.

Si AB, au lieu d'aller de A en B, allait de B en A, il y aurait encore mouvement de rotation, mais en sens contraire. C'est ce qu'exprime la figure 413.

951. **Action d'un courant circulaire horizontal sur un courant rectiligne, horizontal et limité, mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du courant circulaire.** — La vérification expérimentale des résultats énoncés dans le paragraphe précédent, exige des courants d'une intensité considérable. Aussi modifie-t-on généralement la forme de l'expérience ; on la change en une autre où le courant XY agit un grand nombre de fois sur le courant AB.

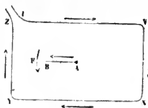


Fig. 414.

En un mot, on compose un système multiplicateur analogue à celui du

galvanomètre. Soit un courant UVXYZ (*fig.* 414) contourné en forme de rectangle et dont le sens est indiqué par l'ordre alphabétique des lettres. Soit AB un courant horizontal marchant de A en B et dont le centre de rotation A est au centre du rectangle. En considérant une partie quelconque du courant rectangulaire et en raisonnant comme nous l'avons fait dans le § 950, on voit qu'elle agit pour faire tourner AB dans le sens marqué par la flèche F. Ce courant rectangulaire pourra être répété autant de fois que l'on voudra, et par suite son action sera multipliée.

Le plus souvent, au lieu d'un courant rectangulaire, on emploie un courant circulaire DMD'M' (*fig.* 415), que l'on répète un grand nombre de fois. Une partie quelconque du courant circulaire agit pour faire tourner AB dans le sens de la flèche F. Considérons par exemple un petit élément du cercle M, menons la tangente MT qui est le prolongement de cet élément. Prolongeons AB et menons la perpendiculaire commune à MT et à AB, elle se projette en T. Le courant qui chemine en M s'approche de cette perpendiculaire commune, le courant AB s'en approche aussi; donc il y a attraction et rotation de AB dans le sens de la flèche F. On démontrerait de même que tout élément du courant circulaire, situé sur la demi-circonférence DMD', attire AB; que tout élément situé sur la demi-circonférence DM'D' le repousse. Toutes ces actions s'accordent donc à faire tourner le courant mobile dans le même sens.

La rotation changera de sens si AB change lui-même de sens. Sur la figure 416, on peut recommencer les raisonnements faits sur la précédente.

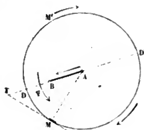


Fig. 415.

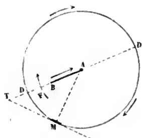


Fig. 416.

En général, on peut résumer les résultats de la théorie et de l'expérience dans cet énoncé : Lorsque le courant mobile s'éloigne du centre, le mouvement de rotation a lieu en sens inverse du courant circulaire auquel il est soumis; lorsque le courant mobile s'approche du centre, il tourne dans le sens même du courant circulaire qui agit sur lui.

952. **Appareil. — Expérience.** — Le courant AB (*fig.* 417) est constitué par un fil métallique mobile sur une pointe d'acier verticale qui repose sur le fond d'une capsule de métal contenant du mercure. Le courant arrive en A par une colonne métallique D qui communique avec le pôle positif de la pile, il suit AB qui se recourbe en BC et plonge dans l'eau acidulée d'un vase métallique VV' mis en rapport avec le pôle négatif. La colonne D, qui

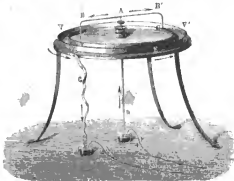


Fig. 417.

traverse le vase, passe dans un bouchon verni et isolant fixé à une ouverture pratiquée au centre du vase, de sorte que le courant est forcé de suivre la route indiquée. En réalité dans notre appareil, le courant arrivé en A suivra et le fil AB et le fil AB' qui est tout semblable, mais il n'y a pas à s'en inquiéter, car on peut voir que les actions d'un courant circulaire sur deux pareils courants sont concordantes. Le second fil AB'C' permet de donner de la solidité et de l'aplomb au petit équipage mobile, dont les deux extrémités C et C' sont reliées par un cercle métallique.

Pour faire agir un multiplicateur circulaire, on entoure le vase d'une couronne formée d'un ruban de cuivre recouvert de soie, qui s'enroule un très-grand nombre de fois et qui est traversé par un courant. Une seule pile donne le courant AB et les courants circulaires. A cet effet, l'un des bouts du fil de la couronne est mis en communication en E avec le bord du vase, l'autre bout G en communication avec le pôle négatif; et alors le courant, après avoir suivi la marche DABC, passe dans la spirale avant de retourner à la pile.

953. L'expérience montre que le mouvement de rotation de AB est dans le sens que la théorie avait indiqué. En intervertissant les communications des extrémités du multiplicateur, on intervertit le sens du courant qui y circule, et le courant AB s'arrête et tourne en sens inverse. Si l'on fait marcher le courant mobile de B en A, le sens de la rotation est aussi changé.

954. **Action d'un courant horizontal indéfini sur un courant vertical mobile autour d'un axe vertical.** — Soit XY (*fig.* 418) un courant horizontal indéfini situé sur le plan horizontal; soit AB un courant vertical descendant mobile autour de l'axe vertical CD.

Pour déterminer l'action de XY sur AB, il faut mener la perpendiculaire commune. A cet effet je prolonge AB jusqu'à la rencontre en I du plan

HH', et du point I, j'abaisse sur XY une perpendiculaire IK qui est la perpendiculaire commune cherchée. En effet, elle est perpendiculaire à XY par construction, et à AB comme horizontale passant par le pied I d'une verticale. Le point K partage le courant XY en deux parties KX et KY. Étudions successivement les actions de chacune d'elles sur le courant mobile. Les courants KX et AB s'attirent comme s'approchant tous deux de la perpendiculaire commune, et cette attraction agit pour porter AB vers X. Quant à AB et KY, ils se repoussent; cette répulsion agit pour éloigner AB de Y, et par conséquent concorde avec l'action de KY pour porter AB vers X. Quelle que soit la position de AB, le même raisonnement conduira à la même conclusion; toujours AB sera sollicité à s'éloigner de Y et à s'approcher de X : par conséquent AB tournera autour de l'axe CD jusqu'à ce que le rectangle ABCD ait son côté AB porté vers X et éloigné de Y.

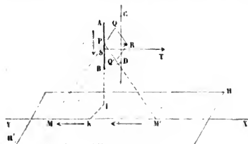


Fig. 418.

955. **Résultante des actions exercées.** — On démontre sans peine que, pour l'équilibre, le plan ABDC doit se trouver parallèle à XY. Considérons, en effet, deux éléments M et M' du courant XY, situés tous deux à égale distance du point K, et un élément P du courant AB; menons MP, M'P et PK (*). L'action répulsive de M sur P peut être représentée par une force PQ dirigée sur le prolongement de MP; de même, l'action attractive de M' sur P est une force PQ' dirigée suivant PM' : les forces PQ et PQ' sont d'ailleurs égales (949), car les éléments M et M' sont à égale distance de P. Or je dis que leur résultante PR et le courant fixe XY, situés évidemment dans le plan PMM', sont parallèles comme perpendiculaires à une même droite PK. En effet, PK, qui va du sommet au milieu de la base du triangle isocèle PMM', partage l'angle au sommet MPM' en deux parties égales; de même PR, diagonale du losange PQRQ', partage l'angle QPQ' en deux parties égales : donc l'angle KPR, formé par les bissectrices de deux angles adjacents et supplémentaires, est droit, et PK est perpendiculaire à PR. D'ailleurs PK est perpendiculaire à MM' ou à XY, comme allant du sommet au milieu de la base du triangle isocèle MPM'. Donc les deux droites PR et XY sont parallèles.

On démontrerait de même que toutes les actions des éléments du cou-

(*) La ligne PK manque sur la figure, le lecteur est prié de la rétablir.

rant XY, prises deux à deux, ont une résultante dirigée suivant PR. De même, toutes les actions de XY sur tous les éléments de AB, tels que P′, P″, P‴, etc., se réduisent à une série de forces, toutes parallèles à XY et qui peuvent se composer en une seule ST parallèle aux premières. Le point d'application de ST et son intensité varieront selon la position de AB, mais toujours sa direction sera constante. L'équilibre ne sera par conséquent possible que si ST (*fig.* 419) rencontre l'axe de rotation, c'est-à-dire que le plan ABCD doit devenir parallèle à XY.



Fig. 419.

Le courant AB, au lieu d'être descendant, est-il ascendant (*fig.* 420), les mêmes raisonnements montrent que la direction de ST est inverse de la précédente et que la position d'équilibre de AB serait vers Y.

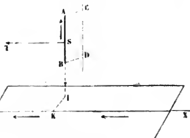


Fig. 420.

956. **Action d'un courant circulaire, fixe et horizontal sur un courant vertical, limité et mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du courant circulaire.** — En général on transforme cette expérience en une autre dans laquelle agissent des courants répétés un grand nombre de fois.

Soit un courant circulaire horizontal, qui suit la direction des flèches marquées (*fig.* 421); soit AB le courant vertical, mobile autour d'un axe CD qui passe par le centre O du cercle dont le plan est rencontré en I par la ligne AB. Joignons OI et menons le diamètre RR′, passant par cette droite. Tous les éléments de courant, situés sur la demi-circonférence RMR′, attirent AB, et agissent

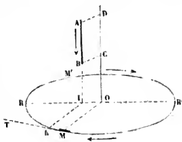


Fig. 421.

pour le faire tourner dans le sens RMR'. Les autres éléments situés sur RM'R' repoussent AB, et la répulsion ainsi exercée agit pour augmenter l'effet de la première action. La démonstration en est facile : soit, par exemple, M un élément de courant. Menons la tangente MT, le rayon MO, et, par le point I, la ligne IK parallèle à MO : cette ligne IK est évidemment perpendiculaire à AB et au petit élément de courant M. Or, les courants AB et M s'approchent tous deux de la perpendiculaire commune ; donc ils s'attirent. De même M', symétrique de M, et le courant AB se repoussent. Le conducteur mobile AB est donc sollicité à tourner autour de l'axe CD, et il prend son mouvement de rotation. Mais à mesure qu'il se déplace, les forces, qui produisent ce déplacement, se retrouvent toujours les mêmes à cause de la symétrie de l'appareil, et toujours elles agissent pour continuer le mouvement de rotation. Ainsi l'expérience, que nous allons réaliser, est une modification très-profonde de celle que nous avions proposée dans le paragraphe précédent ; mais elle n'en est qu'une extension.

956 *bis*. **Expérience.** — Pour réaliser l'expérience, on se sert d'un vase métallique VV' (*fig.* 422) analogue à celui qui a été décrit dans le § 852. Mais, au courant mobile horizontal, on substitue un courant AB vertical et très-long, attaché à une traverse de bois TT' qui est soutenue par une pointe Q sur le fond de verre d'une capsule. Vers le haut de la longue colonne de métal C qui porte cette capsule est un petit vase *vv'* semblable au vase inférieur VV', mais en communication métallique avec cette colonne, et le fil AB qui se recourbe en A et en *a* plonge dans l'eau acidulée de chacun de ces deux vases. Le pôle positif étant mis en communication avec la colonne par l'intermédiaire de L' et le pôle négatif avec le vase inférieur, le courant monte le long de la colonne, arrive au vase *vv'* vient en *a*, puis suit AB pour se rendre à la pile. Mais entre la pile et le vase VV' est intercalée une couronne multiplicatrice KK' dont l'un des bouts communique en C' avec le vase inférieur et dont l'autre bout communique en L avec le pôle négatif de l'appareil voltaïque. Tout étant disposé, on voit que le mouvement de rotation de AB a lieu dans le sens que la théorie indique.

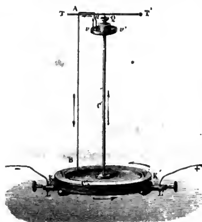


Fig. 422.

957. **Action de la terre sur les courants.** — Les résultats signalés dans

les paragraphes précédents présentent un grand intérêt. D'abord, ils nous font voir comment, par le raisonnement seul, on peut déduire de quelques phénomènes peu nombreux les différents effets qui se produisent lorsque deux courants de forme arbitraire sont mis l'un en présence de l'autre. Ensuite ils vont nous conduire à l'explication rationnelle des mouvements que manifestent les courants mobiles, quand on les abandonne à eux-mêmes. Enfin, grâce à cette théorie, nous allons arriver à la découverte de nouveaux courants qui circulent à l'intérieur de la terre, et dont l'existence avant Ampère n'était pas soupçonnée.

958. **Action de la terre sur un courant vertical mobile autour d'un axe vertical.** — Dans le fil AB de l'appareil décrit au § 956 *bis*, nous pouvons faire passer un courant qui, après être descendu le long de AB, se rendra directement au pôle négatif de la pile, sans circuler à travers le fil de la couronne multiplicatrice. Nous aurons alors un courant vertical (*) mobile autour d'un axe vertical, et qui ne sera soumis en apparence à aucun courant extérieur. C'est ce que représente la figure 423 : la couronne multiplicatrice est enlevée, et L est en rapport direct avec le vase VV'.

Le système mobile, étant abandonné à lui-même, prend toujours la direction est-ouest, et AB se fixe vers l'est, exactement comme il le ferait sous l'action d'un courant horizontal indéfini, qui circulerait au sein de la terre en allant de l'est placé en X vers l'ouest placé en Y (955). Si l'on fait monter de B en A le courant qui suit AB, il se fixe à l'ouest. Et, circonstance bien remarquable, c'est à l'est ou à l'ouest magnétique que AB vient se placer.

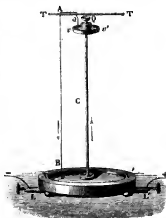


Fig. 423.

De là Ampère conclut que tout se passe comme s'il circulait, au-dessous du courant mobile, un courant allant de l'est à l'ouest magnétique.

L'expérience qui suit va nous prouver que, dans nos contrées, ce courant terrestre est au sud du lieu de l'observation.

959. **Action de la terre sur un courant horizontal mobile autour d'un axe vertical.** — Si l'on reprend

(*) La partie mobile de l'appareil se compose encore du courant horizontal Aa et du courant vertical qui descend de a jusqu'au vase vv'; mais en rendant ces parties très-petites, comme le montre la figure, les actions exercées sur elles sont négligeables. Si Aa était d'une longueur un peu notable, les effets signalés au § 959 se produiraient.

l'appareil (*fig.* 424), qui a déjà été décrit (952), mais dont la couronne multiplicatrice est actuellement enlevée, on aura un courant horizontal mobile autour d'un axe vertical, et qui ne sera soumis à aucune action, si ce n'est à celle du courant terrestre dont nous venons de reconnaître l'existence. Or l'expérience prouve que, dans ces circonstances, le courant AB tourne autour de l'axe vertical passant par le point A; et, quand il marche de A vers B, la rotation a lieu de telle sorte que B va de l'est à l'ouest en passant par le nord : la figure 425 permet de suivre le sens de cette rotation.

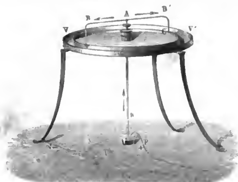


Fig. 424.

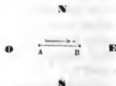


Fig. 425.

960. Ce mouvement permet de déterminer la position du courant terrestre. En effet, ce courant qui va de l'est à l'ouest (958), est situé soit au nord, soit au sud du plan vertical qui passe par le courant mobile, soit enfin dans ce plan lui-même. Supposons-le successivement dans ces diverses positions, et recherchons celle qui peut produire le mouvement observé. Si AB (*fig.* 426), mobile autour d'un axe vertical passant par le point A, est soumis à l'action du courant E'O', qui est placé au nord, il tournera de l'est à l'ouest en passant par le sud, comme le démontrerait le raisonnement du § 950 : ce qui n'est pas conforme au résultat de notre expérience. Le courant terrestre n'est donc pas au nord du lieu de l'observation. Si AB était soumis à l'action d'un courant placé exactement au-dessous de lui, il resterait au repos dès qu'il arriverait à se trouver parallèle à ce courant et dirigé dans le même sens; il ne tournerait pas d'un mouvement continu, comme l'expérience l'a fait voir. Au contraire, le raisonnement du § 950 prouve que, soumis à un courant EO situé au sud, le courant AB doit tourner de l'est à l'ouest en passant par le nord, et c'est précisément ce que l'expérience a donné. Donc le courant terrestre est au sud du lieu où nous observons.

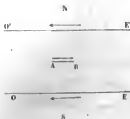


Fig. 426.

Si l'on se transportait en différents points du globe, on trouverait que le mouvement de rotation aurait lieu en sens inverse dans l'hémisphère sud. D'où l'on conclut que le courant terrestre est au nord de cet hémisphère. Il est donc à l'équateur magnétique.

961. **Conclusion.** — Les mêmes expériences se répètent sur tous les méridiens, et on est amené à concevoir le courant terrestre, comme tournant autour de la terre en suivant une ligne voisine de l'équateur. Toutefois, il est impossible d'admettre l'existence d'un seul courant terrestre; il est probable qu'au sein de la terre circulent une multitude de courants dont l'ensemble agit dans les expériences que nous avons fait connaître comme un seul courant voisin de l'équateur, et allant de l'est à l'ouest.

962. **Action de la terre sur un courant rectangulaire.** — Suspendons le rectangle qui nous a servi dans nos premières expériences. Suivant la partie DE (*fig.* 427), le courant descend; suivant FG, le courant monte. Donc, sous l'action de la terre, le rectangle doit se placer dans la direction est-ouest : DE fixé vers l'est, GF vers l'ouest (958). Quant aux courants EF et DG, qui se dirigent suivant les côtés horizontaux du rectangle, la terre exerce sur eux des actions qui se détruisent, comme appliquées à des courants égaux marchant en sens contraires, et situés à la même distance du courant terrestre.

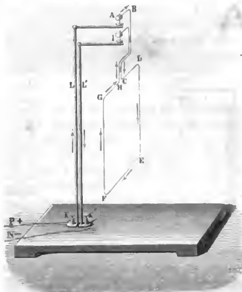


Fig. 427.

963. **Courants astatiques.** — Le rectangle, qui vient de se diriger de lui-même, est celui qui a servi (947 et 948) pour établir les actions des courants parallèles ou angulaires. N'est-il pas à craindre que les mouvements, qui ont été aperçus alors, n'aient été occasionnés par l'action de la terre? On peut se rassurer à ce sujet : car le cadre XY n'a été approché qu'au moment où le rectangle se trouvait déjà au repos. Mais il n'en est

pas toujours de même : l'action de la terre serait nuisible à certaines expériences; elle empêcherait la libre manifestation des phénomènes spéciaux que l'on veut étudier. On a, en conséquence, imaginé des dispositions de courants, telles que la terre soit sans influence sur eux : ces sortes de courants s'appellent *astatiques*. Un modèle de courant astatique est sous les yeux du lecteur (*fig.* 428). Les courants se propagent suivant l'ordre indiqué par les lettres de l'alphabet : on voit que les deux courants verticaux sont descendants, et comme la terre agit pour les porter tous deux à l'est, son action se trouve annulée. D'autre part, les courants horizontaux sont égaux deux à deux, et de sens contraires de chaque côté du cadre; le courant terrestre agit donc avec la même force pour les faire tourner en sens inverses : il laisse le rectangle immobile.

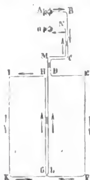


Fig. 428.

964. **Courants circulaires mobiles.** — Revenons aux courants que la terre peut diriger. Au lieu d'un rectangle, rendons mobile autour d'un axe vertical le courant circulaire OE (*fig.* 429); le plan du cercle doit se diriger de l'est à l'ouest. En effet, le courant, qui circule le long d'un arc de cercle AB (*fig.* 430), peut être remplacé par une série de courants horizontaux AC, DE, et verticaux CD, EF (949). Cette substitution faite pour toutes les parties de OE, il reste, d'une part, des courants horizontaux, sur lesquels les actions de la terre s'équilibrent (comme cela avait lieu dans le cas du rectangle mobile), et, d'autre part, des courants ascendants du côté E, et descendants de l'autre côté O : les premiers sollicités vers l'est, les seconds vers l'ouest; leur ensemble doit donc se diriger et le plan du cercle devenir perpendiculaire au méridien magnétique : ce que l'expérience confirme.

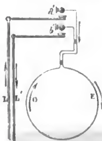


Fig. 429.



Fig. 430

965. **Solénoïdes.** — Imaginons un grand nombre de cercles, perpendiculaires tous à un même axe qui passe par leur centre. Un pareil système se réalise au moyen d'un fil (*fig.* 431) qui s'enroule sur un cylindre suivant une hélice et dont les deux extrémités reviennent horizontalement, puis se relèvent en montant l'une à côté de l'autre, et se terminent enfin par des pointes convenablement disposées pour que le système commu-

nique avec les coupelles et soit soutenu comme il a été dit (945). Si un courant entre par l'une des extrémités *a* du fil et sort par l'autre *b*, il suit les spires de l'hélice, descend du même côté dans toutes, et remonte toujours du côté opposé.

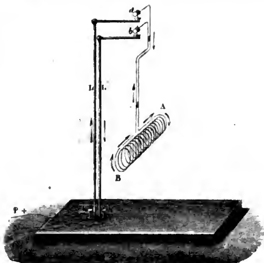


Fig. 431.

Sous l'action de la terre, le système se déplacera jusqu'à ce que les courants descendants soient venus à l'est et les courants ascendants à l'ouest, mais, notons-le bien, à l'est et à l'ouest magnétiques : c'est-à-dire que l'axe horizontal du solénoïde sera dirigé du nord au sud, exactement comme l'axe d'une aiguille aimantée. Ampère a donc construit avec les courants une espèce d'aimant qui se fixe comme celui de la boussole (*).

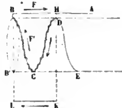


Fig. 432.

J'ai dit que cet appareil équivalait à un ensemble de courants circulaires, perpendiculaires à l'axe de l'hélice. En effet, le courant d'une spire BCD de l'hélice (*fig.* 432) peut être remplacé par des courants sinueux, qui suivent, les uns, des génératrices du cylindre, et les autres des perpendiculaires à ces génératrices. L'ensemble des premiers forme un courant équivalent à LK, égal et de sens contraire au courant horizontal BH qui longe le cylindre, et se trouve ainsi neutralisé (949). Il ne reste plus alors que les courants qui sont contenus dans des plans perpendiculaires à l'axe du cylindre et qui équivalent à un courant circulaire.

966. **Action des solénoïdes et des aimants sur les solénoïdes.** — Puisque l'une des extrémités du solénoïde se dirige toujours vers le nord, et

(*) Un solénoïde, mobile autour d'un axe horizontal, est une véritable aiguille d'inclinaison et se dirige comme elle.

l'autre vers le sud, il est naturel de distinguer deux pôles dans le solénoïde comme dans l'aiguille aimantée, et de les désigner par les mêmes appel-

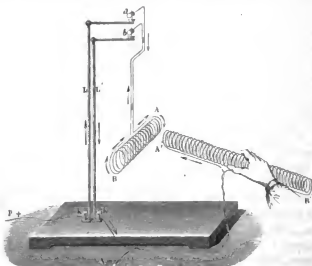


Fig. 433.

lations de pôle *austral* et de pôle *boréal*. Une fois arrivé jusque-là, il n'est personne qui ne se demande, si les pôles de deux solénoïdes agissent les uns sur les autres et qui ne pressente l'action qu'ils exercent : comme le lecteur l'a déjà prévu, les pôles de même nom, tels que A, A', se repoussent; les pôles de noms contraires s'attirent. Allons plus loin et mettons les solénoïdes en rapport avec les aimants : le pôle austral d'un solénoïde est attiré par le pôle de nom contraire d'un aimant, et repoussé par le pôle de même nom, et quand un solénoïde fixe agit sur une aiguille aimantée mobile, il dirige et oriente l'aiguille exactement comme le ferait un aimant. Un solénoïde est donc un véritable aimant.

967. **Nouvelle théorie des aimants.** — Ampère, appuyé sur ces faits d'expérience, proposa une théorie nouvelle des aimants. Pour lui, il n'y a plus ni fluide austral ni fluide boréal : un aimant est un véritable solénoïde et tout autour des particules qui le constituent, circulent des courants dans une perpétuelle activité. L'ensemble de ces courants préexiste dans l'acier et dans le fer doux, avant l'aimantation; mais alors ils sont dirigés, les uns dans un sens, les autres dans un autre, sans aucun ordre régulier, et leurs actions égales et contraires s'équilibrent. Toute cause, qui produit l'aimantation, a pour effet d'amener un certain nombre de courants à prendre des positions telles qu'ils circulent dans le même sens, et

que, formant des séries de solénoïdes, placés les uns le long des autres, ils donnent les phénomènes que nous avons étudiés.

Ampère fit voir que tous les courants particulaires, qui circulent en très-grand nombre dans une même tranche prise perpendiculairement à l'axe de l'aimant, déterminaient la même action extérieure qu'un courant circulaire unique placé dans la même tranche. La seule différence essentielle entre les solénoïdes et les aimants consiste en ceci : dans les solénoïdes, les pôles sont aux extrémités mêmes, tandis que, dans les aimants, ils sont situés toujours à une certaine distance des extrémités. Ampère explique ces résultats en faisant remarquer que dans les solénoïdes, les courants circulaires sont astreints, par la construction même de l'appareil, à demeurer tous dans des plans perpendiculaires à l'axe, tandis que dans l'aimant les courants particulaires doivent être situés probablement dans des plans généralement inclinés sur cet axe, et cela par suite de leurs actions mutuelles.

968. **Remarques.** — Cette nouvelle manière de concevoir la constitution des aimants n'est pas sans importance, bien qu'on ne puisse pas affirmer qu'elle soit l'expression exacte de la vérité. Si l'hypothèse d'Ampère n'offre pas le caractère de la certitude absolue, si les courants, qui circulent dans un aimant, n'ont pas été reconnus ; du moins la théorie d'Ampère repose sur des faits vrais, indépendants de toute supposition, faits dont elle se trouve comme l'expression fidèle : aussi l'adopterons-nous. Quelle que soit l'opinion qu'on se forme de sa réalité, il reste toujours acquis cette vérité, qu'un aimant se comporte comme un solénoïde, dans toutes les circonstances où l'on s'est placé jusqu'ici. Toute découverte nouvelle, faite avec les aimants, devra donc être vérifiée avec les solénoïdes, et réciproquement ; si l'accord se maintient toujours, la théorie d'Ampère deviendra pour nous de plus en plus probable, nous serons conduits à la prendre comme la vérité même. Jusqu'ici, il faut le dire de suite, il ne s'est trouvé aucun fait qui l'attaque ; il y a mieux : en s'appuyant sur elle, de grandes découvertes ont été réalisées.

969. **Sens du courant du solénoïde auquel un aimant est assimilé.** — Une question pratique se présente souvent, celle de reconnaître le sens du courant qui constitue le solénoïde auquel un aimant peut être assimilé. Voici deux méthodes : la première consiste à prendre l'aimant, et à le laisser se diriger de lui-même sous l'action de la terre, après l'avoir rendu mobile dans un plan horizontal. Dans la partie du barreau aimanté, qui se trouve alors vers l'est, les courants doivent être descendants ; ils doivent être ascendants dans la face du barreau placée vers l'ouest. De cette manière, le solénoïde se trouve complétement déterminé. La figure 434 représente un barreau auquel la règle a été appliquée.

Mais la considération des points cardinaux, quoique assez simple, peut être évitée et remplacée par une autre plus simple encore : celle de la gauche et de la droite de l'observateur. En effet, que l'observateur se place devant l'aimant AB (*fig.* 434), en dirigeant sa gauche vers le pôle austral, il sera situé à l'ouest magnétique par rapport à l'aimant, et les courants du solénoïde, qui sont devant ses yeux, iront évidemment de bas en haut, dirigés de ses pieds à sa tête comme cela a lieu pour le spectateur d'Ampère. Cela sera vrai, quand bien même on déplacerait le barreau, pourvu que le pôle austral soit toujours placé à la gauche de celui qui l'observe ; d'où cette règle pratique : Le pôle austral est à la gauche du courant qui circule dans le barreau aimanté.


Fig. 434.

970. **Action réciproque des courants produits par la décharge de la bouteille de Leyde.** — Les courants, produits par la décharge de la bouteille de Leyde, doivent agir les uns sur les autres, et cela comme les courants de la pile voltaïque. Mais l'électricité mise en mouvement par une décharge de cette bouteille, est si peu abondante qu'il faut des appareils très-délicats pour accuser une action sensible. M. Weber y parvint cependant. A cet effet, il s'est servi d'un système où les actions étaient multipliées et qui, en principe, se compose de deux courants circulaires et verticaux CC', KK (*fig.* 435) placés à angle droit : l'un CC' est fixe, l'autre KK' est mobile autour d'un diamètre vertical commun à tous deux. Il est clair que le cercle mobile est sollicité à se diriger dans le plan du cercle fixe. Qu'on regarde, en effet, en plaçant l'œil au-dessus de la verticale VV', et l'on verra les courants supérieurs qui font des angles tels que le courant mobile est sollicité à prendre la position CC' ; on reconnaîtra aussi que les actions des courants inférieurs concordent avec les précédents.

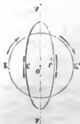

Fig. 435.


Fig. 436.

Au lieu de deux cercles, M. Weber prend deux bobines (*fig.* 437), l'une constituée par un fil de métal qui fait 5 000 tours bien isolés entre eux, l'autre par un fil de métal qui en fait 3 000. La bobine mobile est intérieure à la bobine fixe ; elle est soutenue par un étrier SS' suspendu lui-même à deux fils métalliques F et G qui sont reliés par un fil isolant I et qui amènent le courant. Que la décharge d'une bouteille de Leyde soit produite entre B et E, un courant passe, comme les flèches l'indiquent, à travers les deux bo-

bines dont les fils servent d'excitateur, celle qui est mobile prend aussitôt un mouvement observable.

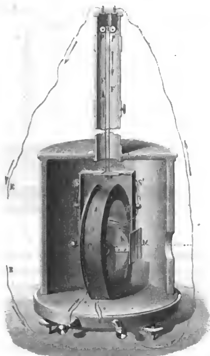


Fig. 437.

Terminons par la description de quelques phénomènes qui sont dus à l'action réciproque des courants et des aimants et qui s'expliquent aisément dans la théorie d'Ampère.

971. **Rotation d'un courant par un aimant.** — Voici une expérience d'Ampère : un vase, qui a été décrit (958), porte un petit équipage semblable à celui de la figure 423. On fait passer le courant qui suit la marche indiquée par les flèches ; l'appareil prend déjà un mouvement de rotation sous l'action de la terre. Mais au-dessous du vase, et dans le prolongement de l'axe de rotation, vient-on à placer un aimant énergique, de manière que le pôle austral étant en haut, son action soit contraire à celle de l'aimant terrestre ; le mouvement change de sens. Il eût été simplement accéléré, si l'on avait placé l'aimant avec le pôle boréal en haut.

Pour expliquer ce mouvement, il suffit de considérer l'aimant comme un solénoïde. Si le pôle austral est en haut, des raisonnements semblables à ceux du § 956 montreront que, par l'action des courants les plus voisins, AB doit prendre un mouvement de la gauche à la droite du spectateur, qui, debout les pieds sur le pôle, regarderait le courant mobile.

972. **Rotation d'un aimant par un courant.** — L'expérience suivante est due à M. Faraday. Un aimant cylindrique AB (*fig.* 438) est lesté par une masse de platine, et flotte comme un aréomètre dans le mercure d'une éprouvette. La pointe C plonge dans une goutte de mercure qui remplit une petite cavité creusée en forme de coupelle à la partie supérieure de cet aimant. Par la pointe, on fait arriver un courant qui parcourt

d'abord l'aimant, puis qui s'épanouit et rayonne, pour s'échapper enfin par un anneau métallique, bordant l'éprouvette à l'intérieur. Dès que le courant passe, l'aimant tourne sur lui-même autour de son axe. Si le courant change de sens, la rotation change aussi de sens : il en est de même si l'on intervertit les pôles, en retournant l'aimant lesté en sens inverse.

Fig. 438.

L'explication de ce mouvement est très-simple, si l'on considère l'aimant comme un solénoïde. Soit en effet le pôle austral de l'aimant, situé à la partie supérieure (*fig.* 439) : le courant du solénoïde, qui équivaut à cet aimant, circule suivant les flèches ; on le verra en appliquant la règle donnée (969). Le courant qui entre par la pointe sort en suivant des droites telles que CDE. Considérons le courant DE qui passe à travers le mercure de l'éprouvette : il attire tout élément DA du solénoïde placé du côté A, et repousse tout élément placé de l'autre côté : donc l'aimant est sollicité à tourner dans le sens de la flèche F, c'est-à-dire de la gauche à la droite du spectateur, qui serait debout les pieds en C. Si le courant allait de E en D, ou bien si les pôles étaient retournés, on démontrerait aisément que la rotation changerait de sens.

Fig. 439.

Avec le même appareil, une autre expérience peut être faite. La pointe plonge directement dans le mercure de l'éprouvette; et on voit l'aimant tourner tout autour de cette pointe. Le phénomène s'explique en considérant l'action des courants, tels que DE, D'E', CE'', CE''' (*fig.* 440) sur le solénoïde. Nous laissons au lecteur le soin d'appliquer la théorie au cas actuel et de trouver lui-même l'explication du fait.

Fig. 440.

973. **Retour sur l'historique.** — Nous avons achevé l'exposé des principales découvertes d'Ampère et des travaux qui s'y rattachent le plus directement. D'autres études nous réclament. Mais avant de quitter cette œuvre de génie, qu'il nous soit permis de dire en quelques mots la série des idées qui ont conduit l'auteur et qui l'ont amené à voir dans l'expérience d'Œrsted l'action que les courants exercent sur les courants. Il a exposé lui-même la suite de ses raisonnements; nous ne ferons que le suivre. Une aiguille aimantée, pensa-t-il, se dirige du nord au sud; évidemment, d'après les expériences d'Œrsted, cette direction s'expliquerait très-bien si un courant terrestre cheminait constamment au-dessous de l'aiguille aimantée et allait de l'est à l'ouest. Ainsi, au lieu de l'hypothèse de l'aimant terrestre admise jusqu'à ce jour, nous pouvons, se dit-il à lui-même, en imaginer une autre, celle d'un courant ou d'une série de courants allant de l'est à l'ouest; et comme ce raisonnement s'applique à tous les lieux du globe, c'est une série de courants circulaires qu'il faut supposer. Mais pourquoi tout aimant agissant sur un aimant ne pourrait-il pas être considéré comme la terre vient de l'être? Et si deux aimants, que je me représente comme un assemblage de courants, agissent l'un sur l'autre, c'est que les courants s'attirent, se repoussent, exercent en un mot des actions réciproques qu'il faut étudier. Il le pensa et il en fit promptement la vérification. Peu de jours après la découverte d'Œrsted, Ampère avait mis ses réflexions à l'épreuve de l'expérience, et si son œuvre n'était pas complète, du moins les grands traits en étaient arrêtés.

CHAPITRE VII

INDUCTION

974. **Historique.** — « Les époques, où l'on a ramené à un principe uni-« que des phénomènes considérés auparavant comme dus à des causes « différentes, ont été presque toujours accompagnées de la découverte « d'un très-grand nombre de faits nouveaux, parce qu'une nouvelle ma-« nière de concevoir les causes suggère une multitude d'expériences à ten-« ter, d'explications à vérifier. » C'est Ampère qui s'exprimait ainsi en 1824, à propos de sa théorie nouvelle des aimants, et ses paroles ne tardèrent pas à recevoir de hautes confirmations. Mais de toutes les découvertes qu'il a suggérées, celle de M. Faraday fut la plus magnifique. Ampère avait formé

des aimants par la seule intervention de l'électricité, M. Faraday voulut obtenir de l'électricité au moyen des aimants. Ce problème se transforma bientôt en un autre qui, d'après la théorie d'Ampère, est exactement le même : Une hélice qui, traversée par un courant, possède toutes les propriétés d'un aimant ordinaire, ne sera-t-elle point capable de développer, sous certaines conditions, un courant d'électricité dans un conducteur voisin ? M. Faraday, possédé de ces idées, se mit à l'œuvre, et dans le travail qu'il publia en novembre 1832, il fit connaître une nouvelle branche de l'électricité appelée l'*Induction*.

975. **Induction par les courants.** — Voici l'énoncé des premiers résultats obtenus :

1° Un courant, qui commence, fait naître dans un *circuit* voisin un courant de sens contraire.

2° Un courant, qui finit, fait naître dans un circuit voisin un courant de même sens.

3° Un courant, qui s'approche d'un circuit, agit comme un courant qui commence.

4° Un courant, qui s'éloigue, agit comme un courant qui finit.

On a nommé *courant inducteur* le courant voltaïque ordinaire qui agit par influence, et *courant induit* celui qui apparaît comme une manifestation de l'influence exercée.

Les courants induits sont toujours des courants de faible durée, ils cessent presque à l'instant où le courant inducteur acquiert soit son maximum, soit son minimum d'intensité, ou bien quand ce courant cesse de s'approcher ou de s'éloigner du circuit soumis à l'influence.

976. **Appareil.** — M. Faraday est arrivé à la découverte de ces phénomènes au moyen d'appareils qui permettent de faire circuler un courant d'une grande longueur à une petite distance d'un circuit formé par un fil métallique présentant un développement considérable. A cet effet, il enroule sur une bobine de bois deux fils de cuivre, revêtus de soie afin que leurs spires soient isolées les unes des autres. Ces fils ont 100, 200, 300 mètres de longueur et même davantage.

Sur la bobine H, représentée dans la figure 441, sont enroulés deux fils placés côte à côte, mais isolés l'un de l'autre. L'un des fils, que j'appellerai le fil F, a ses deux extrémités A et A' en communication permanente avec un galvanomètre G. L'autre fil F' communique d'une manière continue par l'un de ses bouts B' avec un pôle de la pile, tandis que l'autre bout plonge dans une petite coupe C pleine de mercure.

Vient-on à plonger l'autre pôle de la pile dans la même coupe, un courant circule à travers le fil F'. Aussitôt l'aiguille du galvanomètre est déviée, et le sens de la déviation indique que, dans le circuit formé par le fil F et le galvanomètre, il passe un courant de sens contraire à celui qui

commence dans le fil F'. Nous l'appellerons courant induit *inverse*. En continuant à observer l'aiguille, on voit que la déviation ne dure pas,

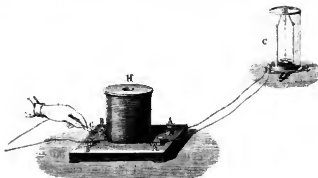


Fig. 441.

quoique le courant inducteur continue à circuler ; l'aiguille oscille de part et d'autre de sa première position d'équilibre et revient au zéro.

Quand l'aiguille est arrivée au repos, on rompt le courant du fil F', en retirant le rhéophore de la coupe de mercure dans laquelle il avait été introduit. Aussitôt l'aiguille du galvanomètre est déviée et indique que dans le circuit voisin de celui où le courant finit, il naît un courant de même sens que nous nommerons courant induit *direct*.

977. **Induction par un courant qui s'approche ou qui s'éloigne.** — On se sert de deux bobines, dont l'une peut pénétrer dans l'intérieur de l'autre, pour étudier les effets produits par un courant qui s'approche, ou

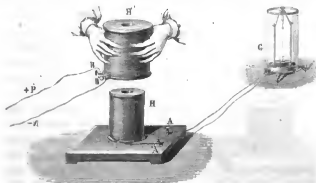


Fig. 442.

par un courant qui s'éloigne. La bobine H (*fig.* 442) n'a qu'un fil dont les bouts A, A' sont mis en communication permanente avec un galvano-

mètre. La bobine H' n'a aussi qu'un fil, dont les extrémités B et B' sont en rapport continu avec les pôles d'une pile. Les bobines H et H' étant loin l'une de l'autre et l'aiguille du galvanomètre au zéro, on approche H' de H; aussitôt on voit l'aiguille dévier et indiquer que dans H il naît un courant inverse de celui qui circule en H'. Ce courant cesse dès que la distance des bobines demeure constante. Quand l'aiguille est revenue au zéro, on éloigne les bobines, et l'on voit qu'il naît en H un courant de même sens que celui de H', c'est-à-dire un courant direct.

978. **Induction par les aimants.** — D'après la théorie d'Ampère, un aimant n'est qu'un solénoïde et peut être assimilé à celle de nos bobines qui est parcourue par le courant voltaïque; il doit donc produire des courants d'induction, et si cette théorie est vraie, on constatera par expérience les faits suivants : Un aimant, qui s'approche, fait naître dans un circuit voisin un courant contraire à celui du solénoïde auquel l'aimant peut être assimilé; un aimant, qui s'éloigne, fait naître un courant inverse du précédent, c'est-à-dire direct par rapport au courant de l'aimant; enfin il arrivera encore qu'un aimant à l'instant où il se forme, qu'un aimant à l'instant où il perd son aimantation fera naître des courants comme un courant qui commence et comme un courant qui finit.

Ainsi la théorie d'Ampère, combinée avec les expériences précédentes, fait prévoir qu'à l'aide des aimants il est possible de développer des courants électriques.

979. **Expériences.** — Les expériences, qui font apparaître cette production remarquable d'électricité, se réalisent au moyen d'une bobine à un seul fil, dont les bouts C, C' (*fig.* 443) sont en communication permanente avec un galvanomètre éloigné G. Dès qu'un aimant est approché vivement de la bobine, l'aiguille indique un courant instantané et de sens contraire à celui du solénoïde que l'aimant représente; puis, quand l'aimant est immo-

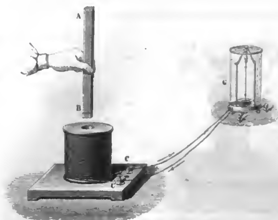


Fig. 443.

bile, l'aiguille retourne au zéro. Dès qu'on éloigne l'aimant, l'aiguille indique un courant de même sens que celui imaginé dans l'aimant par Ampère.

Si l'on met d'avance dans l'intérieur de la bobine un faisceau de fer doux F (*fig.* 444) et qu'on approche un aimant, le fer doux s'aimante, et sur le fil de la bobine s'exercent à la fois et l'action de l'aimant qui s'approche, et l'action de l'aimant qui prend naissance ; ces deux actions sont de même sens, et la déviation de l'aiguille est beaucoup plus considérable qu'avant l'intervention du fer doux. Lorsque l'aimant est éloigné, les effets sont ceux que nous avons annoncés.

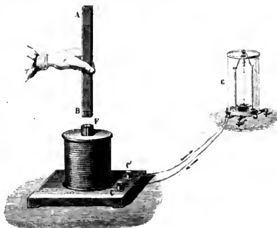


Fig. 444

980. **Loi de Lenz.** — Une loi relie les phénomènes d'induction aux phénomènes électro-dynamiques et nous révèle une relation intime qui existe entre eux. Cette loi a pris le nom de celui qui l'a découverte; la voici : Le courant, développé dans un circuit qui se déplace par rapport à un courant voisin, est toujours dirigé en sens inverse de celui qui cheminerait dans le circuit, si le déplacement se produisait par l'action mutuelle des deux courants. Expliquons cet énoncé sur un exemple particulier : Un circuit s'approche d'un courant identique de forme et vient s'y superposer, il naît dans ce circuit un courant inverse du courant inducteur, c'est-à-dire inverse de celui qui, cheminant dans le circuit mobile, aurait produit, par son attraction, le rapprochement qui a eu lieu. La loi s'applique évidemment aux aimants, quand ils exercent des effets d'induction.

981. **Induction d'un courant sur lui-même.** — M. Faraday fit observer dès 1832, qu'un fil métallique peut être considéré comme formé par la juxtaposition d'une multitude de fils fins placés en faisceaux parallèlement les uns aux autres, et que, soit au moment où un courant prend naissance dans ce fil, soit au moment où il finit, des phénomènes d'induction doivent se manifester. Dans chacun des fils fins, qui composent le fil total, les courants, qui commencent ou qui cessent, induisent, dans les fils élémentaires

voisins, des courants qui diminuent ou augmentent le courant primitif. M. Faraday n'est parvenu qu'en 1834 à trouver moyen de constater l'exactitude de ses vues théoriques et à démontrer l'induction du courant qui finit.

Voici l'appareil dont il s'est servi : B (*fig.* 445) est un fil très-long enroulé sur une bobine et dont les deux bouts sont unis avec les deux pôles de la pile PN. Dans le voisinage des pôles, en A et C, deux fils sont attachés et communiquent avec un galvanomètre G. Le courant de la pile va d'abord de P en A ; arrivé là, il se bifurque : une partie suit la route AGC en traversant le galvanomètre, et une autre partie passe le long du fil de la bobine ; puis du point C le courant revient à la pile. L'aiguille du galvanomètre, déviée par le courant qui circule, quitte sa position d'équilibre qui est *a'b'*, et vient en *ab*. Elle est alors ramenée au zéro, soit à la main, soit par toute autre action, et on l'y maintient par une petite masse de cuivre figurée près du point *a'* et placée du côté convenable pour que l'aiguille ne puisse pas reprendre sa déviation, mais garde toute sa mobilité pour se déplacer en sens inverse. Ces dispositions prises, on rompt le courant soit entre A et P, soit entre N et C, en K par exemple, et l'on voit tout à coup l'aiguille du galvanomètre dévier dans le sens qui correspond à sa mobilité actuelle, et indiquer qu'un courant passe de C en A.

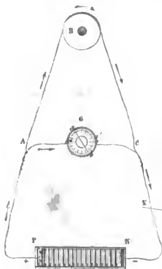


Fig. 445.

Que conclure de cette déviation? Remarquons avant tout qu'au moment où la communication avec la pile est interrompue, il ne reste plus d'autre circuit fermé que le circuit CGAB. Or nous venons de constater que dans une partie de ce circuit le courant suit la direction CA ; dans l'autre partie il ne peut donc s'avancer que suivant ABC. Au moment de la rupture, le courant, qui cesse dans le fil B, joue donc le rôle de courant inducteur pour faire naître instantanément un courant induit direct, auquel on donne souvent le nom d'*extra-courant*.

On a démontré aussi l'induction du courant qui commence par des expériences analogues; mais cette induction présente moins d'intérêt, puisqu'elle ne fait qu'affaiblir le courant primitif : c'est pour cela que nous ne nous y arrêterons pas.

981 *bis*. **Des circonstances qui influent sur l'intensité d'un courant induit sur lui-même.** — L'extra-courant est faible, quand le fil est tendu

en ligne droite ; toutefois il est possible de l'apprécier. Il se manifeste avec plus d'énergie, lorsque le fil est enroulé en hélice. Sa puissance tient alors à ce que le courant qui finit dans chaque spire agit comme un courant extérieur sur les spires voisines, et à la première induction s'ajoute l'induction des spires les unes sur les autres. Enfin, quand, dans l'intérieur de la bobine, on a disposé un morceau de fer doux, le courant induit est encore plus puissant, car la rupture du courant, en désaimantant le fer doux, produit un courant d'induction qui s'ajoute au précédent.

982. **Intensité et tension des courants induits.** — Le but que M. Faraday avait poursuivi se trouvait complétement atteint; mais un progrès fait dans la science en amène toujours d'autres : bientôt, en répétant les expériences de l'illustre physicien, on arriva à découvrir ce qu'on n'avait pas soupçonné d'abord, c'est qu'avec des courants inducteurs relativement faibles, il était possible de produire des courants induits d'une intensité des plus considérables. Sans développer les théories, qui ont été données sur ce sujet et qui nous entraîneraient jusqu'au milieu de questions non encore résolues, nous nous contenterons de constater le fait par les preuves les plus convaincantes.

Il suffit, dans ce but, de répéter l'expérience du paragraphe 977, en supprimant le galvanomètre et en attachant en A et A' deux fils dont les bouts libres seront maintenus à quelque distance l'un de l'autre. Si la bobine inductrice est approchée très-vivement, le courant induit acquiert une telle intensité qu'une étincelle jaillit au point où le circuit est interrompu. Dans la bobine induite il s'est donc développé un courant capable de produire des effets de tension que l'on ne peut obtenir directement qu'avec des piles très-puissantes, comme celle de M. Gassiot (828).

Le phénomène se manifeste plus aisément si l'on répète l'expérience du paragraphe 976 : au moment où l'on interrompt le courant, une magnifique étincelle apparait entre les extrémités libres du fil induit, surtout si le fil induit est d'une grande longueur. Mais il faut que l'interruption du courant inducteur soit brusque pour produire l'explosion à la distance la plus considérable.

983. **Induction produite par un aimant sur un disque en mouvement.** — Un conducteur est-il déplacé dans le voisinage d'un aimant, dans ce conducteur des courants se développent. Que l'on fasse tourner autour d'un axe vertical une plaque de cuivre horizontale PP (*fig.* 446) au-dessous d'un aimant mobile AB; aux points qui s'approchent de chaque pôle naissent des courants qui le repoussent (loi de Lenz); aux points qui s'en éloignent

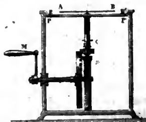


Fig. 446.

naissent des courants qui l'attirent, et par ces deux raisons l'aiguille se trouve entraînée dans le sens de la rotation du disque. C'est ce qu'avait observé Arago en 1825, avant que l'induction ne fût connue, et nécessairement il n'avait pas pu se rendre un compte satisfaisant de ce phénomène que les expériences de Faraday sont venues expliquer.

Pour que l'agitation de l'air, produite par le mouvement de la plaque, ne trouble pas l'aiguille, une feuille de parchemin EE' ferme la partie supérieure d'une boite qui contient le plateau tournant; le pivot qui supporte l'aiguille est posé sur cette feuille.

984. **Induction par l'action de la terre.** — La terre peut être assimilée à un aimant ou à un solénoïde; il n'est donc pas douteux qu'elle ne puisse induire des courants dans les circuits ou dans les conducteurs en mouvement. C'est un fait facile à constater : la bobine AB (*fig.* 447) a-t-elle les deux bouts G et G' de son fil réunis à un galvanomètre, et se trouve-t-elle placée dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, on constate un courant, quand on la retourne bout pour bout, en la faisant tourner autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique. Ce courant est de même sens que celui qui naitrait si la partie supérieure B s'approchait d'un pôle austral et si la partie inférieure A s'en éloignait.



Fig 447.

985. **Induction Leyd-électrique.** — La décharge de la bouteille de Leyde donne des courants induits qui ont été reconnus par un grand nombre de physiciens. Mais les divers observateurs ne se sont pas accordés d'abord sur le sens de ces courants. M. Verdet a montré la cause de cette divergence d'opinions. En réalité une décharge de la bouteille de Leyde est comme instantanée; elle représente un courant qui commence et presque en même temps un courant qui finit. Dans le circuit voisin, il y a donc successivement deux courants induits de sens contraires, et, selon les expériences, les effets de l'un ou de l'autre prédominent. Par des dispositions ingénieuses, M. Verdet est parvenu à les isoler.

Nous nous contenterons de constater cette induction par l'expérience suivante : Deux fils longs et bien isolés étant enroulés l'un dans le voisinage de l'autre, on fait passer la décharge d'une bouteille à travers l'un d'eux : une commotion est ressentie par celui dont les deux mains tiennent chacune un bout de l'autre fil.

986. **Courants induits de différents ordres.** — Il en sera de même de tous les courants instantanés : ils produiront dans un circuit voisin deux courants induits successifs et de sens contraires entre eux. C'est ce

qui arrive lorsque l'on veut employer un courant induit à produire lui-même d'autres courants induits. Par exemple, au lieu de réunir les extrémités A, A' du fil de l'appareil (*fig.* 441) avec un galvanomètre, qu'on les mette en communication avec les extrémités B_1, B'_1 d'une bobine toute semblable à celle dont les bouts sont B, B', le premier courant induit, que nous avons constaté déjà, passera dans le fil $B_1B'_1$ et pourra à son tour induire des courants dans un fil voisin $A_1A'_1$. Comme nous l'avons dit, le premier courant étant instantané donnera successivement naissance à deux autres ; c'est ce que les travaux d'Henry et de M. Abria ont établi, et ce que ceux de M. Verdet ont confirmé.

987. **Machine de Masson.** — A la place du galvanomètre employé par M. Faraday dans ses expériences (*fig.* 445), on peut substituer tout autre appareil capable d'éprouver des modifications par la circulation du flux électrique, et l'on verra alors se produire tous les phénomènes auxquels un courant peut donner naissance. Mais ici des remarques importantes sont à faire. Les phénomènes, qui ne gagnent rien à la durée du courant, mais qui dépendent de son intensité seule, seront très-avantageusement reproduits par les machines d'induction : ainsi les commotions, les étincelles, l'aimantation des aiguilles d'acier. Mais les décompositions chimiques, où les éléments séparés s'accumulent en plus grande quantité à mesure que la durée du courant se prolonge, ne s'effectueront qu'instantanément à chaque rupture, et il n'apparaîtra que de faibles quantités d'éléments séparés.

M. Masson a fait construire une machine, où les conditions de l'expérience de Faraday se trouvent très-bien réalisées, car la bobine est formée par un fil de grande longueur. A la place du galvanomètre se disposent les appareils qui doivent témoigner des effets du courant induit ; et au point K, où le courant doit être rompu, M. Masson a placé une roue dentée métallique, dont l'axe touche toujours le fil N de la pile NP et dont les dents viennent chacune à leur tour frapper sur un ressort qui communique avec CK : ce qui permet de produire aisément un grand nombre de passages et d'interruptions de courant et, par suite, des courants induits fréquents et des secousses très-multipliées, si ces courants servent à donner des commotions.

L'appareil de Masson a été disposé aussi pour que l'on puisse tirer parti des courants induits que fait naître un courant extérieur. Une bobine est disposée à l'intérieur de la première ; elle est recouverte d'un gros fil qui reçoit le courant de la pile et sur le trajet duquel on place la roue interruptrice. Si l'on tient à la main les deux bouts du fil de la bobine induite, on reçoit une commotion violente au moment où le courant cesse dans la bobine inductrice.

988. **Machine de M. Ruhmkorff.** — La machine de M. Ruhmkorff est

exactement, du moins en théorie, la machine de Masson ; mais elle est construite dans des conditions excellentes qui rendent les effets d'une puissance extraordinaire. L'hélice inductrice est formée par un fil dont les extrémités ressortent en H et en G (*fig.* 418). Ce fil est gros et d'une longueur peu considérable ; les dimensions en sont mesurées, de sorte que l'action du courant inducteur sur le circuit induit soit maximum. Quant à l'hélice induite, elle est formée d'un fil fin et excessivement long, qui

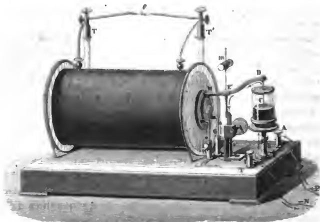


Fig. 418.

compte jusqu'à 30 kilomètres et dont les spires sont isolées avec le plus grand soin. L'enveloppe de soie n'est plus suffisante, cette fois, pour maintenir dans le conducteur métallique le courant induit ; on sépare alors les couches successives que forme le fil sur la bobine avec une autre substance isolante, la poix résine.

Des colonnes de verre se terminent par les tiges de métal T, T' qui sont chacune en rapport avec l'un des bouts du fil induit, et c'est là que l'opérateur va prendre l'électricité produite. De petites bornes métalliques A, I reçoivent les pôles de la pile, et communiquent avec le fil inducteur.

988 *bis*. **Interrupteur.** — La communication étant établie. il faut rompre le courant d'une manière brusque, puis le faire passer dans le fil inducteur et recommencer à de courts intervalles ces mêmes opérations. M. Ruhmkorff avait disposé un appareil appelé *interrupteur*, qui de lui-même produisait la rupture du courant. A la suite de l'étude qu'il en a faite, M. Poggendorf a déterminé les conditions à remplir pour que l'interruption soit la meilleure possible, et récemment M. Foucault a réalisé une disposition ingénieuse qui remplit très-bien le but. L'interrupteur de M. Foucault

est essentiellement formé par une pointe CD, qui communique avec l'une des extrémités du fil de la bobine inductrice; en plongeant dans le mercure d'une coupe mise en relation avec l'un des pôles de la pile, cette pointe ferme le courant qui passe alors en suivant la série des conducteurs marqués dans l'ordre alphabétique depuis A jusqu'à I. Quand l'extrémité C cesse de plonger dans le mercure, le courant est interrompu et l'induction a lieu. Un mécanisme simple produit le mouvement de la pointe : elle est fixée à un levier MD soutenu par une lame élastique E et dont l'extrémité M est formée par une armature de fer doux. Dès que le courant passe, le faisceau de fil de fer *f*, contenu dans la bobine, prend une aimantation subite et attire l'armature M. Dès lors la lame élastique entraînée s'infléchit, la pointe se soulève et le courant s'interrompt. Aussitôt M cesse d'être attiré, puisque le faisceau de fils de fer est à l'état naturel; la lame élastique se redresse, s'infléchit même en sens inverse, le courant passe de nouveau, et ainsi de suite.

Pour que le courant induit soit puissant, il importe, avons-nous dit, que la rupture soit brusque. Quand elle se fait dans l'air, une étincelle brillante jaillit au point d'interruption; le courant inducteur continue donc à se propager à travers l'air, et ne se ralentit que peu à peu. L'interruption a une durée plus courte lorsque, entre la pointe et le mercure, s'interpose de suite un corps mauvais conducteur et de densité plus considérable que l'air. L'alcool joue bien ce rôle; versé d'avance au-dessus du mercure, il se glisse sous la pointe dès qu'elle se soulève.

988 *ter*. **Commutateur.** — Lorsque la machine fonctionne, il importe de pouvoir l'arrêter sans toucher les pôles de la pile. En T est un appareil qui permet d'interrompre ou de renverser le courant et que l'on nomme le *commutateur;* il a été décrit au paragraphe 945 *bis*. Nous l'avons supprimé dans la figure afin d'éviter la confusion d'un trop grand nombre de pièces.

989. **Effets de la machine de M. Ruhmkorff.** — Le fil induit de la bobine de M. Ruhmkorff est soumis dans toute son immense longueur à l'action du courant inducteur qui exerce, en chaque point de ce circuit de plusieurs lieues, une force électro-motrice et y effectue la séparation des fluides. Chaque section de ce long fil est donc comme un élément de pile, et la bobine entière réalise un appareil voltaïque dont les éléments, bien plus nombreux que ceux de la pile de M. Gassiot (828), reproduisent par leur ensemble des effets de tension électrique incomparablement supérieurs à ceux que l'on avait obtenus jusque-là.

Place-t-on deux fils en regard, comme nous l'avons fait dans la figure 448, des étincelles puissantes et nombreuses éclatent avec violence. Réunit-on ces fils avec les tiges conductrices de l'œuf électrique, il se produit une lueur magnifique dont la couleur varie selon les vapeurs et les

gaz raréfiés qui sont introduits; des stries transversales sillonnent l'arc lumineux qui brille entre les deux conducteurs. Veut-on s'opposer à la recomposition des électricités en interposant un corps isolant entre elles? Il faut que la résistance soit grande, car une lame de verre épaisse de plusieurs doigts est transpercée. Quant aux commotions de cette formidable machine, il ne faut s'y exposer que si le courant inducteur est extrêmement faible.

990. **Machine de Pixii.** — Dès que Faraday eut fait connaître qu'il était possible de développer des courants au moyen des aimants, de produire, comme on l'a dit, des courants électro-magnétiques, Pixii construisit une machine, où tout était combiné de manière à donner, sans peine, des courants par le moyen d'un fort aimant en fer à cheval AB (*fig.* 449) tournant vis-à-vis d'un électro-aimant E, E'. L'un des bouts du fil de cet électro-aimant plonge dans du mercure contenu dans un flacon de verre, et l'autre bout est placé un peu au-dessus de la surface liquide. La rotation de l'aimant produit un courant, et avec la disposition particulière indiquée des étincelles jaillissent à la surface du mercure.

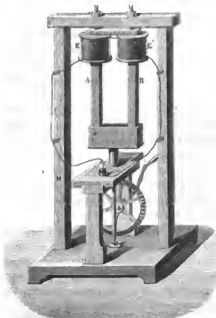


Fig. 449.

Pixii avait d'ailleurs arrangé des mécanismes pour faire produire au courant toutes les actions possibles; nous n'insisterons pas à ce sujet, car les mêmes détails de construction vont se retrouver dans la machine de Clarke.

991. **Machine de Clarke.** — Clarke disposa la machine Pixii dans des conditions meilleures. Il rendit mobile l'électro-aimant; ce qui fut un double avantage : en premier lieu les dimensions de l'électro-aimant sont moins considérables que celles de l'aimant; en second lieu, par cette nouvelle disposition, il est possible de faire arriver l'électro-aimant dans le voisinage plus immédiat des pôles de l'aimant, et d'obtenir par suite des courants plus puissants. La machine se compose donc d'un aimant en fer à cheval FF' (*fig.* 450) et d'un électro-aimant mobile autour

d'un axe parallèle à ses branches et perpendiculaire au plan de l'aimant.

Si l'on imagine que les deux bouts du fil de l'électro-aimant soient réunis, en A par exemple, et que l'on fasse tourner EE' autour de l'axe de rotation, le fer doux, qui s'y trouve contenu, s'aimantera et se désaimantera alternativement. D'après les règles données, cet aimant qui commence, cet aimant qui finit feront naître dans le circuit fermé des courants dont le sens est facile à déterminer. Ainsi soit EE' dans une position (*fig.* 451) telle qu'en E se trouve un pôle austral, en E' un pôle boréal ; le courant du solénoïde, qui tiendrait lieu de cet aimant momentané, circulera dans le sens des flèches marquées autour de ces pôles. Pendant un quart de tour de EE', l'aimantation diminue et cesse : ce qui développe dans le fil un courant de même sens que celui du solénoïde, comme il est marqué. Après un peu plus d'un quart de tour, l'aimantation, qui naît en sens contraire, développe un courant qui s'accorde avec le précédent, ainsi que les flèches de la figure 452 l'indiquent. En effet, au second quart de tour, EE' s'aimantera en sens contraire de tout à l'heure. Mais un aimant qui commence fait naître un courant inverse.

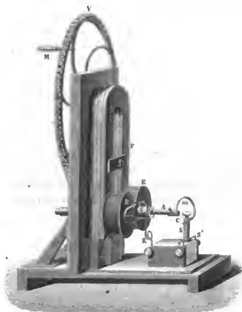


Fig. 450.

Donc, dans le fil nous aurons un courant de même sens que le précédent.

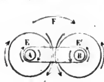


Fig. 451.

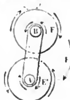


Fig. 452.

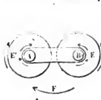


Fig. 453.

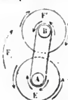


Fig. 454.

Les figures 453 et 454 montrent, pour le demi-tour suivant de EE', les

courants induits qui sont de sens contraire aux précédents. A chaque demi-tour, le sens du courant changera toujours : on a des courants alternatifs.

992. **Effets de cette machine.** — Ces courants ont été utilisés pour la production de tous les effets obtenus déjà avec la pile; ils se recueillent d'ailleurs sur l'axe A et sur l'anneau A', qui sont séparés par de l'ivoire et mis en communication avec les bouts du fil de l'électro-aimant : ils forment les pôles de ce nouvel appareil voltaïque.

993. *Étincelle.* — La machine de la figure 450 est disposée pour la production de l'étincelle. Le courant, quand il se produit, suit la route A'RSS'K*m*CA, ou la route exactement inverse selon que le pôle positif momentané de la machine est en A' ou en A ; il suit cette route, car le ressort R, le fil SS', la colonne K, l'arc *m*, l'anneau C sont métalliques, et le socle de bois qui porte ces pièces a deux joues de métal où elles s'implantent. Toutefois, l'arc *m* n'appuie pas toujours sur l'anneau excentrique C; à un moment la partie saillante de cet anneau dépasse l'extrémité de l'arc *m* qui est trop court pour atteindre l'axe A, et l'étincelle jaillit d'autant plus brillante que le courant est plus intense : cette intensité maximum a lieu au moment où la ligne des pôles de cet électro-aimant est perpendiculaire à celle des pôles de l'aimant fixe (*fig.* 452 et 454).

994. *Décompositions électro-chimiques.* — Les décompositions électro-chimiques exigent que le courant circule toujours dans le même sens.

Afin d'éviter les changements de sens du courant, on se sert d'un appareil que l'on appelle ***commutateur*** et qui n'est autre chose qu'un cylindre creux d'ivoire pouvant se fixer sur l'axe A. et entouré de deux demi-viroles V et V' (*fig.* 455). L'une V' porte un prolongement métallique P au moyen duquel on la fait communiquer avec A', l'autre V communique avec A par une vis qui traverse tout le cylindre d'ivoire. Deux ressorts R,R' s'appuient l'un à droite, l'autre à gauche sur le commutateur et les extrémités de ces ressorts sont employées comme pôles de cette pile électro-magnétique. Imaginons que la rotation de l'électro-aimant soit telle que l'électricité positive vienne par l'axe A ; de là elle ira en V, en R et reviendra en A', en suivant les flèches. Après une demi-rotation de EE' l'électricité positive viendra par A' ; mais la demi-virole V' aura pris la place

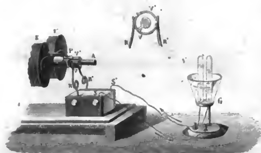


Fig. 455.

de V; le ressort R sera en communication avec A′, et se retrouvera encore cette fois en rapport avec le bout du fil qui donne l'électricité positive. De même le ressort R′ sera en communication permanente avec le fil qui fournit l'électricité négative; R et R′ seront comme les pôles d'une pile. Un voltamètre G, un appareil à décomposer les sels, donneront les décompositions avec séparation des éléments aux deux pôles.

995. *Commotions.* — La machine de Clarke peut être employée pour produire des commotions. Dans ce cas, ce n'est pas le courant ordinaire toujours faible qui sert à produire le choc. C'est le courant induit sur lui-même. La machine (*fig.* 456) est disposée alors dans des conditions qui reproduisent celles de l'expérience de Faraday, du moins autant qu'il est possible avec la différence des appareils. Les fils, qui portent les poignées M et M′ que l'observateur doit tenir à la main, sont en communication constante l'un avec A, l'autre avec A′, et c'est au moment où la rupture du courant s'effectue, comme il a été dit à propos de l'étincelle, que la commotion a lieu.

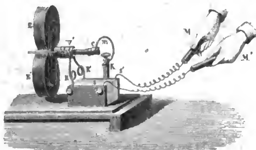


Fig. 456.

CHAPITRE VIII

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES.

996. Grâce à la découverte d'Œrsted, qui fournit un moyen facile de constater le passage de l'électricité, Seebeck, en 1823, put reconnaître qu'un courant se développait par l'application de la chaleur sur l'une des soudures d'un circuit métallique formé par des métaux hétérogènes. L'expérience, par laquelle il fut amené à constater le phénomène, fit connaître aux physiciens une nouvelle source d'électricité, et les courants, provoqués ainsi par la chaleur, ont pris le nom de courants *thermo-électriques*. Ce

sont les circonstances de leur production, les dispositions qui permettent d'agrandir leurs effets, enfin les applications qu'on a pu en faire qui seront l'objet de ce chapitre.

997. **Expérience de Seebeck.** — Seebeck avait soudé aux deux extrémités d'un cylindre de bismuth SS' (*fig.* 457) les deux extrémités d'une lame de cuivre C; le circuit formait un rectangle métallique dont l'un des côtés était le cylindre de bismuth et les trois autres côtés la lame de cuivre. Une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical était placée dans l'intérieur du cadre, que l'on dirigeait d'abord parallèlement au méridien magnétique: Seebeck chauffait l'une des soudures S, et il constatait qu'aussitôt l'aiguille aimantée était déviée. La déviation indiquait un courant qui passait du bismuth au cuivre à travers la soudure chauffée. Si l'on chauffait également les deux soudures, aucun courant ne traversait le circuit.

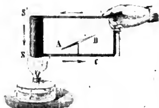


Fig. 457.

L'expérience, qui vient d'être faite, peut être reprise avec d'autres métaux; si l'on remplace le bismuth par un fil de platine, le cuivre par un fil de fer, on observe le même phénomène, et il en est de même avec tout circuit hétérogène. La seule différence à noter, c'est que la déviation de l'aiguille aimantée, qui manifeste l'intensité du courant, change de grandeur selon la nature des métaux employés.

Dans les piles ordinaires on a appelé force électro-motrice la force, quelle qu'elle soit, qui provoque la séparation des électricités au sein de chaque élément; le même nom a été donné à la force qui détermine la mise en liberté des mêmes fluides lorsqu'il existe une différence de température entre deux soudures du circuit.

998. **Emploi du galvanomètre.** — L'expérience fondamentale, concernant la production des courants thermo-électriques, se réalise très-bien avec un galvanomètre. Deux barreaux métalliques, cuivre et antimoine (*fig.* 458), soudés ensemble, sont mis en communication chacun par leur bout libre A, A' avec le fil d'un multiplicateur. Dès que la soudure est chauffée, l'aiguille du galvanomètre dévie et, pourvu que les barreaux soient assez longs pour que la chaleur n'arrive pas au fil du multiplicateur, la déviation est de même sens que dans l'expérience de Seebeck. Toutefois les essais, qui ont été tentés pour l'étude de cette classe de phénomènes, n'ont pas tardé à montrer que le fil du galvanomètre devait être gros et court,

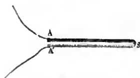


Fig. 458.

pour que la déviation de l'aiguille ne fût pas moins considérable que dans l'expérience directe, et nous en avons donné la raison en discutant la formule d'Ohm (919). On a encore reconnu que la soudure n'est pas indispensable : il suffit de poser un fil de fer sur un fil de platine, pour voir un courant se développer lorsque l'on élève la température du point de contact.

999. **Série thermo-électrique.** — Une première recherche doit être exécutée : il faut reconnaître quel est le sens du courant qu'on obtiendra en associant ensemble différents métaux. A cet effet, on a répété l'expérience de Seebeck, en employant tous les métaux que l'on accouple deux à deux ; et l'on a noté le sens de la déviation de l'aiguille aimantée, quand une des soudures est échauffée. M. Becquerel a surtout multiplié les essais de ce genre, mais au lieu d'opérer à la manière de Seebeck, il a préféré se servir du galvanomètre. Voici l'ordre suivant lequel il a rangé les substances métalliques :

Bismuth.	Cuivre.	Zinc.
Platine.	Or.	Antimoine.
Plomb	Argent.	
Étain.	Fer.	

Chacun des métaux de la série forme, avec l'un quelconque des métaux qui suivent, un couple tel que le courant passe à travers la soudure chauffée en allant du premier métal au second. Ainsi, le bismuth et le platine étant associés, le courant va du bismuth au platine en traversant la soudure chaude.

1000. **Interversion du courant aux diverses températures.** — Le tableau, que nous venons de faire connaître, a été obtenu dans des conditions où la température de la soudure n'était pas très-haute. L'expérience a, en outre, fourni un résultat qu'il est utile de signaler : c'est que, dans ces conditions, l'intensité du courant est sensiblement proportionnelle à l'accroissement de température ; mais cela n'est vrai que dans le cas où l'élévation de température est très-petite. Si cette élévation devient considérable, l'intensité du courant grandit en général plus lentement que la température, et il arrive quelquefois un moment où elle diminue. M. Regnault a constaté que, si l'on associe le cuivre et le fer, et qu'on élève peu à peu la température, l'intensité du courant cesse d'augmenter vers 230°, l'aiguille du galvanomètre reste stationnaire de 230° à 260° : quand on atteint des températures plus hautes, l'aiguille rétrograde et l'intensité du courant diminue, quoique la température continue à croître. M. Becquerel a même reconnu qu'à des températures plus élevées encore le courant changeait de sens et se rendait du fer au cuivre à travers la soudure échauffée.

1001. **Intensité des courants produits.** — Il ne suffit pas de savoir la direction du courant qui se produit par l'union de deux métaux, il y a encore lieu de rechercher quelle intensité il possède. C'est ce que M. Becquerel

a fait. Dans ce but, il forma une chaîne de métaux soudés les uns à la suite des autres (*fig.* 459); cette chaîne était constituée de telle sorte que l'on eût toutes les associations possibles des métaux qui la composaient. Toutes les soudures furent successivement maintenues à 0°, sauf une seule qui était portée à 20° et dont l'échauffement produisait un courant mesuré par la déviation de l'aiguille du galvanomètre (899). Par là, on pouvait apprécier la valeur des différents couples. On obtint les résultats suivants :

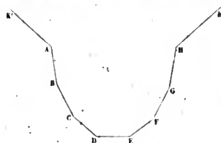


Fig. 459.

Soudure chauffée.	Intensité du courant.	Soudure chauffée.	Intensité du courant.
Fer-étain	31,24	Fer-platine	36,87
Fer-cuivre..........	27,96	Argent-cuivre	2
Cuivre-platine..	8,55		

1002. Courants thermo-électriques obtenus avec un seul métal présentant un défaut d'homogénéité. — Des courants peuvent être produits au moyen d'un seul métal, mais il faut que deux des parties successives de ce métal, où le courant doit se produire, présentent une différence de structure. Que l'on prenne un fil de laiton écroui et que l'on recuise une partie de ce fil, en laissant à l'autre la dureté et la structure particulière qu'il possède après le passage à la filière; puis, qu'on chauffe au point de séparation de la partie recuite et de celle qui ne l'est pas, on trouve un courant qui va de la partie recuite à la partie écrouie en traversant le point chauffé. Les mêmes expériences ont réussi avec un fil d'argent, de cadmium, de cuivre, etc. Le courant marche au contraire de la partie écrouie à la partie recuite lorsqu'on expérimente sur des fils de zinc et de fer. C'est à M. Magnus que sont dues ces expériences, qui montrent nettement l'influence exercée par l'hétérogénéité de structure sur la production des courants thermo-électriques.

Avec le bismuth seul on a obtenu des courants thermo-électriques, en composant un ensemble hétérogène au moyen d'un procédé ingénieux. M. Svanberg a placé en contact un morceau de bismuth cristallisé B (*fig.* 460) dont la longueur était parallèle au plan de clivage du cristal et un autre fragment B' dont la longueur était perpendiculaire à ce même plan. On avait ainsi une barre


Fig. 460.

formée d'un seul métal, mais la moitié de cette barre avait une structure différente de celle de l'autre moitié. En chauffant le point de contact des deux petits barreaux, on obtint un courant. La même expérience a été répétée avec l'antimoine.

Si l'on prend un fil de métal et si l'on vient à faire un nœud à ce fil, l'action mécanique exercée a amené une modification dans la structure de la substance, et l'on observe un courant dès que l'on élève la température près du nœud. De même, si l'on vient à chauffer un fil écroui et bien homogène, tant au point de vue chimique qu'au point de vue physique, on observe un courant; l'élévation de température a en pour résultat de recuire le fil en partie, et dès lors l'homogénéité a cessé d'exister.

1003. Toutes les fois qu'il n'y a pas différence de structure, il est impossible d'obtenir le développement d'un courant. M. Magnus



Fig. 461.

amincit un gros fil de cuivre AD en son milieu BC (*fig.* 461) de manière que les deux bouts, qui avaient un très-fort diamètre, se trouvaient réunis par un fil très-fin. Il ne put obtenir aucun courant, en chauffant le point où le diamètre des fils changeait brusquement. De même avec le



Fig. 462.

mercure, qui ne peut pas présenter d'hétérogénéité de structure, il est impossible d'obtenir un courant thermo-électrique. Une colonne DE de mercure chaud (*fig* 462) ne donne pas de courant quand on la réunit avec une autre colonne mercurielle froide BC, chacune d'elles étant mise d'avance, par les fils A et F, en rapport avec le galvanomètre.

1004. **Piles thermo-électriques.** — Dès que les courants thermo-électriques ont été connus, on n'a pas tardé à construire des appareils, où les éléments producteurs d'électricité se trouvaient groupés, suivant la méthode que Volta avait employée pour associer les éléments de la pile. Alors furent composés des instruments auxquels on a donné le nom de *piles thermo-électriques*. Veut-on construire une pile avec le fer et le platine, on soude, l'un au bout de l'autre, une série de fils de fer et de platine, en faisant en sorte que les métaux se succèdent toujours dans le même ordre. Puis, le circuit étant fermé par un conducteur quelconque, on chauffe les soudures de deux en deux, les soudures impaires par exemple. On pro-

voque la formation de courants qui vont à travers ces soudures, en passant du platine au fer, et qui se trouvent de même sens. Il faut avoir bien soin de ne pas chauffer les autres soudures, parce que des forces électro-motrices inverses naîtraient et détruiraient les premières.

Une pile ainsi constituée peut être fermée sans conducteur interpolaire : il suffit que le dernier fil de platine soit réuni au premier fil de fer. Un effet se remarque, qui pourrait surprendre : si l'on place en présence de l'aiguille aimantée une partie du circuit au moment où la pile est en activité, la déviation de l'aiguille demeure toujours la même, quel que soit le nombre des éléments de la pile, pourvu que la portion du circuit, qui se trouve en regard de l'aiguille, soit toujours de même longueur. Mais si la pile est fermée par un conducteur interpolaire, par exemple, si ses deux barreaux extrêmes sont réunis aux fils d'un galvanomètre, alors la déviation de l'aiguille augmentera avec le nombre des éléments. Ces différences s'expliquent sans difficulté par les lois d'Ohm.

1005. **Effets de ces piles.** — Une pile thermo-électrique peut être employée à produire tous les phénomènes que donnent les piles ordinaires. Watkins a fait rougir un fil métallique au moyen d'une pile thermo-électrique; Antinori a obtenu des étincelles, Botot a produit l'aimantation, et opéré des décompositions chimiques. Toutefois, quand on essaie d'obtenir ces effets avec une pile thermo-électrique, on reconnaît qu'il est indispensable de recourir à un appareil formé d'un très-grand nombre d'éléments. Ainsi, Botot n'a réussi à décomposer l'eau qu'en employant une pile thermo-électrique formée de 120 fils de platine et d'un même nombre de fils de fer qui alternaient avec les précédents. Cette infériorité relative des deux piles thermo-électriques tient à ce que, la force électro-motrice de chaque élément étant très-faible, il faut racheter la faiblesse par le nombre.

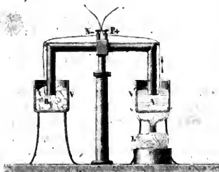


Fig. 463

1006. **Pile de M. Pouillet.** — Mais si la pile thermo-électrique ne peut guère être employée aux mêmes usages que les piles hydro-électriques, elle rend des services d'un autre ordre : elle a été utilisée, par M. Pouillet, pour déterminer les lois des courants. Le plus souvent, elle est employée avec beaucoup de succès à la mesure des températures, et dans l'étude de la chaleur rayonnante, nous en avons vu un bel exemple.

La pile de M. Pouillet (*fig.* 463) se compose d'éléments bismuth et

cuivre : le barreau de bismuth est gros et en forme de fer à cheval, tandis que le fil de cuivre se replie parallèlement, comme le montre la figure. Chaque soudure plonge dans un vase destiné à renfermer, soit de la glace fondante, soit de l'eau à la température convenable. Plusieurs éléments de cette pile peuvent s'associer : il suffit, pour cela, de donner aux fils de cuivre des divers éléments une disposition telle, qu'on ait une série où les deux métaux alternent. On chauffera, bien entendu, les soudures de deux en deux, et on maintiendra froides les soudures intermédiaires.

1007. **Pyromètre de M. Pouillet.** — M. Pouillet a employé, pour mesurer les hautes températures, un élément thermo-électrique, formé de fer et de platine. Cet élément se compose d'un canon de fusil C (*fig.* 464) traversé suivant son axe par un fil de platine F qui vient se souder à l'une des extrémités A du tube de fer. Un galvanomètre interposé ferme le circuit. La soudure étant placée au milieu du foyer de chaleur, un courant thermo-électrique se développe; et comme le fil du galvanomètre unit le fer au platine de l'élément, il représente le conducteur interpolaire, qui permet au courant de se manifester ; aussi voit-on l'aiguille dévier. Si l'on a soin de graduer à l'avance, par comparaison, le pyromètre magnétique avec un pyromètre à gaz introduit dans le même foyer, on pourra ensuite, avec l'appareil thermo-électrique seul, reconnaître la température cherchée.



Fig. 464.

1008. **Pile de Nobili et Melloni.** — Mais de tous les appareils employés à la détermination des températures, celui qui a rendu le plus de services à la science, est la pile de Nobili et Melloni. Cette pile, déjà décrite (522), se compose, comme nous le savons, d'une série de barreaux alternativement de bismuth et d'antimoine (*fig.* 465); ces barreaux ont une disposition telle que toutes les soudures de rang impair soient d'un côté, et celles de rang pair du côté opposé : le tout est enchâssé dans une enveloppe métallique, et séparé des parois par un mastic isolant. Les deux barreaux extrêmes communiquent avec des tiges extérieures TT' que l'on peut mettre en rapport avec le galvanomètre. Deux tuyaux creux servent à garantir la pile, et quand on dirige l'axe d'un de ces tuyaux vers une source de chaleur, les soudures de même ordre s'échauffent : la marche de l'aiguille aimantée indique l'élévation de température.

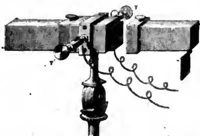


Fig. 465.

1009. **Graduation. — Arc d'impulsion.** — La graduation de l'instrument a été donnée (525), nous n'y reviendrons pas : nous ajouterons un seul détail. Quand la pile est frappée par la chaleur qui émane d'une source, les soudures s'échauffent, un courant a lieu ; et l'aiguille du galvanomètre, chassée par ce courant, s'éloigne du zéro, décrit un arc, puis, arrivée à l'extrémité de cet arc, elle revient vers le zéro, sans l'atteindre, en exécutant ainsi une série d'oscillations, avant de se fixer sur l'une des divisions du cadran. La durée de chaque expérience exige en conséquence un temps assez long. Melloni eut l'heureuse idée de chercher s'il n'y avait pas une relation constante entre le premier arc décrit, qu'il appelle *arc d'impulsion*, et la position à laquelle l'aiguille s'arrête définitivement. Il a reconnu qu'à un premier arc d'impulsion déterminé, correspondait une déviation définitive toujours la même. Par exemple, cet arc étant de 35° avec la pile particulière et le galvanomètre qu'il employait, il reconnut que toujours la déviation définitive était de 20°. Il a construit alors un tableau des arcs d'impulsion successifs et des déviations correspondantes. Chaque expérience ne dure plus alors qu'un instant très-court, celui que l'aiguille met à accomplir son premier mouvement.

1010. **Pince thermo-électrique.** — Une autre disposition très-ingénieuse, due à Peltier, a encore permis de tirer parti des courants thermo-électriques pour la détermination de la température, et spécialement de la température d'un corps solide : ce qui est, non point impossible, mais fort difficile avec un thermomètre ordinaire. La pince thermo-électrique de Peltier se compose de deux éléments, formé chacun de bismuth et d'antimoine, tels que le bismuth B′ (*fig.* 466) de l'un soit réuni à l'antimoine A de l'autre par un fil de cuivre. Le circuit est complété par le fil d'un galvanomètre G. Quand tout l'appareil est à la même température, l'aiguille du galvanomètre est à zéro. Mais si l'on vient à interposer entre les deux soudures un corps dont la température soit supérieure à celle du milieu environnant, les deux soudures s'échauffent, et un courant apparaît, qui fait dévier l'aiguille.

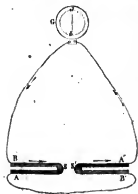


Fig. 466.

Cette pince thermo-électrique a été utilisée très-fréquemment ; nous avons vu en particulier (563) quel usage en ont fait MM. Franz et Wiedmann.

LIVRE CINQUIÈME

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

ACTIONS MOLÉCULAIRES.

Avant d'aborder l'étude de la production et de la propagation du son dans les milieux élastiques, il est indispensable de porter quelques instants notre attention sur un ordre de faits, dont nous n'avons pu dire qu'un mot au commencement de ce cours, nous voulons parler des phénomènes qui dépendent des *actions moléculaires*.

1011. **Forces moléculaires.** — Déjà pour nous rendre compte de la constitution des corps, et pour comprendre comment leur équilibre moléculaire peut se maintenir, soit lorsque la substance est abandonnée à elle-même, soit lorsqu'elle est soumise à une action extérieure, nous avons admis (10) l'existence de deux forces, l'une attractive, l'autre répulsive, s'exerçant entre les particules des corps. Le caractère commun à ces deux forces, c'est de ne se manifester entre les molécules qu'à des distances tout à fait inappréciables pour nos sens, même quand on a recours à l'emploi des instruments les plus grossissants, tandis que les forces, que nous avons étudiées dans les précédents chapitres : la pesanteur, la chaleur, l'électricité, s'exerçaient entre des particules de matières séparées par un intervalle toujours sensible, quelquefois même considérable.

1012. **Adhésion. Cohésion.** — L'attraction moléculaire porte différents noms suivant les circonstances dans lesquelles elle se manifeste, noms d'ailleurs qui ne sont pas pris dans le même sens par tous les physiciens. Quand il s'agira de l'attraction d'un liquide, soit pour un solide, soit pour un liquide, nous l'appellerons alors *adhésion*. Quand elle s'exercera entre les molécules des corps solides qui sont rendues solidaires les unes des autres par son influence, elle sera nommée *cohésion*.

1013. **Phénomènes dépendant de la cohésion.** — Les faits curieux, qui suivent et qui sont faciles à reproduire, doivent être rapportés à la force de cohésion. Partagez, à l'aide d'une lame d'acier bien tranchante, une balle de plomb en deux parties, et lorsque la coupure est encore fraîche, juxtaposez les deux calottes sphériques, en les faisant glisser l'une sur l'autre comme pour reconstituer la balle de plomb. Au bout d'un certain temps les deux fragments de métal seront si intimement unis qu'il deviendra nécessaire d'employer un effort intense pour les séparer. La même expérience réussit tout aussi bien lorsque ce sont deux lames de verre planes doucies à l'émeri fin qu'on met en contact, et, dans ce dernier cas, on peut rendre la cohésion parfaitement évidente en suspendant l'une des lames à un support fixe et en attachant à la lame inférieure, par l'intermédiaire d'un crochet, un petit panier dans lequel on ajoute de la grenaille de plomb. On reconnaît que le poids, qui agit dans une direction normale pour disjoindre les deux disques, doit acquérir une valeur plus grande à mesure que le contact des lames vitreuses se continue pendant un temps plus long. Dans les verreries, on sait par une longue et coûteuse expérience que, lorsqu'on empile les lames de glace les unes sur les autres, il devient impossible de les séparer au bout d'un certain temps, même en exerçant un effort de glissement ; il en est qui se brisent plutôt que de se laisser écarter des lames voisines, avec lesquelles on les avait mises imprudemment en contact.

1014. **Adhésion entre les liquides et les solides.** — L'adhésion peut être rendue sensible au contact d'un solide et d'un liquide. Une lame de verre, quand elle a été bien débarrassée par les lavages des matières grasses et des poussières minérales que l'air y avait déposées, adhère assez fortement à la surface d'un bain d'eau, et lorsqu'on exerce un effort vertical pour la séparer, on voit le liquide se soulever à une hauteur sensible avant que la lame, qui emportera une couche de liquide adhérente avec elle, n'arrive à se détacher.

1015. **Phénomènes capillaires.** — Ces derniers résultats ont permis de concevoir et d'expliquer, 1° le changement de courbure qu'affecte la surface d'un liquide au contact du solide qui y est immergé, 2° l'ascension et la dépression des liquides dans les tubes étroits et ouverts aux deux bouts. En un mot, c'est en faisant intervenir ces forces moléculaires, *adhésion* et *cohésion*, qu'on a pu établir la théorie de ce groupe de phénomènes intéressants, dont quelques-uns se sont déjà présentés à nous dans le cours de nos études antérieures, et qu'on a appelés *phénomènes capillaires*. Nous n'insisterons pas sur la théorie, nous nous contenterons de faire connaître les faits principaux qui les concernent et les lois les plus importantes qui les régissent.

1016. **Faits principaux observés.** — Les faits, que l'on observe, sont

très-différents selon que le liquide mouille ou ne mouille pas le solide.

1° *Le liquide mouille le solide.* — I. Lorsqu'une lame de verre plonge dans l'eau, et plus généralement lorsqu'un solide est immergé, en partie, dans un liquide qui le mouille, la surface de ce dernier s'élève d'une petite quantité au-dessus de son niveau actuel, en présentant une surface concave. C'est ainsi que dans un verre à boire, une pellicule liquide se soulève contre les parois intérieures du verre, et dévie, à cause de sa forme concave, les rayons lumineux qui le traversent. A cause de cela, il est impossible de placer, avec certitude, l'œil dans le plan du niveau de la surface libre.

II. Quand le solide plongé dans un liquide qui le mouille est constitué par un tube capillaire (*fig.* 467), l'immersion provoque l'ascension du liquide dans le tube au-dessus du niveau extérieur, et le principe général de l'hydrostatique qui concerne les vases communiquants (101) paraît alors être en défaut. La hauteur du liquide soulevé est d'autant plus grande que le diamètre du tube est plus petit : en outre, la surface libre du liquide dans le tube se creuse en totalité d'une manière très-sensible, et sa courbure peut être considérée comme sphérique, quand le tube est suffisamment étroit.

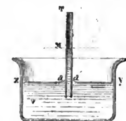
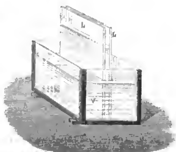


Fig. 764.

III. Entre deux lames (*fig.* 468) parallèles très-rapprochées et mouillées par le liquide, dans lequel elles sont plongées, il y a ascension de la colonne liquide, et la surface terminale présente la forme d'un demi-cylindre circulaire concave.

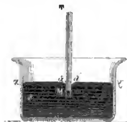
2° *Le liquide ne mouille pas le solide.* — IV. Lorsqu'une lame de verre plonge dans le mercure, ou plus généralement, lorsqu'un solide s'est immergé dans un liquide qui ne le mouille pas, on constate une dépression du liquide autour du solide qui y est plongé, et la surface libre devient convexe aux points où cette dépression se manifeste.


Fig. 468.

V. Si la même expérience est faite en immergeant un tube capillaire (fig. 469) dans un liquide qui ne le mouille pas (tube de verre et mercure), une dépression a lieu dans le tube et la surface libre est convexe.

1017. **Lois expérimentales de la capillarité.** — La loi la plus impor-

tante concernant les phénomènes capillaires porte en physique, le nom de celui qui l'a découverte, le nom de *Jurin*. On l'énonce ainsi : Différents tubes capillaires étant plongés dans un liquide qui en mouille les parois, les hauteurs, auxquelles parvient ce liquide, varient en raison inverse des diamètres de ces tubes. Cette loi suppose que les parois intérieures ont été, au préalable, mouillées par le liquide sur lequel on doit opérer, et de plus que la température est demeurée constante dans le cours des diverses expériences. Lorsque ces précautions sont prises, on reconnaît que la hauteur du liquide soulevé est indépendante de la nature de la substance solide, et de l'épaisseur des parois ; l'eau s'élève à la même hauteur dans des tubes de verre, de cristal, de quartz, dont le diamètre est le même dans tous les cas. Au contraire, la hauteur dépend essentiellement de la nature du liquide employé. L'eau est de tous les liquides connus celui qui s'élève à la hauteur la plus grande dans un tube capillaire donné.


Fig. 469.

La loi de Jurin a été vérifiée par Gay-Lussac avec des tubes dont le diamètre était compris entre 5^{mm} et 0^{mm},5. M. E. Desains a poussé la vérification plus loin en se servant de tubes dont le diamètre très-fin a été jusqu'à 0^{mm},07. Il a trouvé qu'en s'entourant de toutes les précautions nécessaires pour éliminer les causes d'erreur, la loi de Jurin se vérifiait complétement.

1018. **Vérification de la loi de Jurin.** — La méthode expérimentale, adoptée par Gay-Lussac et M. E. Desains, peut être ramenée à un exposé très-simple : elle consiste, 1° à mesurer par un procédé direct le diamètre du tube dans la région, où la surface libre du liquide soulevé, doit parvenir; 2° à mesurer à l'aide du cathétomètre la hauteur de la colonne suspendue dans ce tube, après en avoir mouillé les parois intérieures en aspirant au préalable le liquide au-dessus du point où il doit s'élever.

1019. **Difficultés qui se présentent quand le liquide ne mouille pas les parois du tube capillaire.** — La théorie indique que la même loi doit être vraie dans le cas des liquides qui ne mouillent pas les parois et qui par suite se dépriment dans les tubes capillaires. L'abaissement de la colonne d'un même liquide au-dessous de son niveau extérieur doit varier en raison inverse des diamètres des tubes. Seulement, dans ces nouvelles conditions, la nature des parois doit exercer une influence sensible sur la grandeur de la dépression observée. Toutefois, même en se servant de tubes de diamètres différents fabriqués avec les mêmes

matières, la vérification expérimentale de la loi ne se fait plus d'une manière aussi nette. Ce n'est pas qu'il y ait plus de complication dans l'exécution de l'expérience : ainsi, on peut introduire le liquide qui ne mouille pas le verre, le mercure, par exemple, dans des vases communiquants, dont l'un, très-large, n'occasionne aucune dépression sensible, et dont l'autre soit constitué par le tube capillaire sur lequel on veut expérimenter. La différence des hauteurs du mercure dans les deux vases, estimée au cathétomètre, donne la valeur de la dépression. Mais il se présente une difficulté fondamentale. Quand le liquide mouille le tube capillaire, il dépose contre la paroi intérieure une pellicule liquide très-mince qui demeure adhérente et ne se détache nullement au moment où la colonne s'abaisse au-dessous de son niveau primitif. Il se forme donc, dans l'intérieur du tube capillaire mouillé, comme un second cylindre concentrique au premier, et l'ascension de la colonne se fait dans le tube central dont la surface offre, en tous ses points, une nature chimique et une structure physique absolument identiques; l'on comprend alors très-bien que la nature propre des parois des tubes soit sans influence et que la hauteur du liquide soulevé ne dépende que du diamètre. Au contraire, quand le liquide ne mouille pas la paroi, c'est entre le solide et le liquide que l'action capillaire se produit; et comme la surface intérieure du tube n'offre jamais dans tous ses points une homogénéité parfaite de nature et de structure; comme, d'autre part, il existe, toujours à la surface interne de ce même tube, une couche d'air adhérente qui ne saurait être dissoute par le liquide, on voit de suite qu'il y a là des influences perturbatrices qui rendent bien difficile la vérification de la loi de Jurin. On s'explique, en même temps, pourquoi les dépressions d'une colonne mercurielle dans un tube vide d'air comme celui du baromètre, ne sont pas égales à celles, qui se produiraient dans un tube identique, où l'air aurait un libre accès.

2° Loi. — Entre deux lames parallèles et peu distantes l'une de l'autre, que l'on plonge dans un liquide qui les mouille, la colonne soulevée demeure suspendue à une hauteur qui est la moitié de celle que l'on observe dans un tube dont le diamètre est égal à la distance des deux lames. Cette loi, dont l'exactitude avait été contestée par quelques physiciens à la suite de vérifications mal exécutées, a été démontrée vraie d'une manière irréfutable par les expériences de M. E. Desains.

1020. **Compressibilité des solides.** — Nous avons énoncé (8) ce fait général, que tous les corps étaient compressibles, mais nous ne l'avons véritablement démontré que dans le cas des gaz. La compressibilité des solides s'établit par des expériences indirectes : le fer, quand il a été martelé ou laminé ou écroui, augmente de densité ; donc il éprouve une diminution de volume quand on le soumet à une pression mécanique. Il

en est de même des autres métaux : l'or et l'argent, quand on les polit au brunissoir, acquièrent même à la surface une densité supérieure à celle des couches sous-jacentes.

1021. **Compressibilité des liquides.** — Quant aux liquides, leur compressibilité a été plus difficile à reconnaître et à mesurer. Pendant longtemps, on les a même supposés dépourvus de cette propriété, et on les caractérisait par ces mots : *fluides incompressibles.* Dans les dernières années du dix-septième siècle, les académiciens de Florence tentèrent quelques expériences qui ne furent pas très-heureuses. De l'eau fut renfermée dans une sphère creuse d'argent qu'on ferma ensuite hermétiquement ; puis cette sphère fut soumise à une compression des plus énergiques dans le but d'y produire une déformation. Si ce résultat avait été obtenu, on aurait pu en conclure avec certitude la compressibilité de l'eau, attendu que le volume de la sphère est nécessairement diminué toutes les fois que la forme en est altérée. Mais en observant une déformation du vase sphérique, on reconnut, en même temps, que le liquide suintait goutte à goutte à travers quelques gerçures qui s'étaient produites dans l'épaisseur de la paroi, et la question de la compressibilité des liquides ne fut nullement avancée par cette tentative.

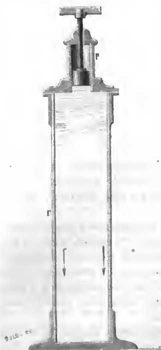


Fig. 470.



Plus tard, Canton et Perkins établirent d'une manière péremptoire le fait de la diminution de volume que l'eau subit quand on la comprime; mais leurs procédés ne permettaient pas de mesurer avec exactitude le coefficient numérique qu'on a nommé coefficient de compressibilité et qu'on peut définir ainsi : La diminution de volume qu'éprouve l'unité de volume d'une substance sous une pression égale à une atmosphère. C'est Œrsted, qui, en 1823, donna le premier une méthode un peu précise pour évaluer le coefficient qui nous occupe.

1022. **Appareil d'Œrsted.** — Œrsted introduit le liquide, sur lequel il

doit opérer, dans une fiole cylindrique P (*fig.* 470) surmontée d'un tube T de diamètre étroit ; ce petit appareil porte le nom de *piézomètre ;* le tube est divisé en parties d'égales capacités, et l'on a mesuré à l'avance le volume du réservoir et celui d'une division. Une bulle de mercure I servant d'index et destinée à isoler du milieu ambiant le liquide qu'on veut comprimer, est placée à la partie supérieure du tube et exactement au-dessus de l'eau. Il vaut encore mieux, en suivant l'indication donnée par M. Despretz, recourber le tube en *b* comme l'indique la figure ; de cette façon, l'air logé dans la courbure fait fonction d'index, et la vapeur d'eau qui pouvait aller se condenser dans le piézomètre et augmenter le volume de liquide qui s'y trouve, est facilement arrêtée par un tampon de papier buvard placé vers la partie supérieure de l'olive *b*.

Le piézomètre ainsi préparé est plongé dans un réservoir plein d'eau C identique pour la forme à celui que nous avons déjà décrit (168) en parlant des expériences de M. Despretz sur la compressibilité des gaz. La pression exercée par le piston P se transmet, par l'intermédiaire du liquide qui remplit le vase, jusqu'au liquide du piézomètre ; en même temps l'eau s'élève dans le petit manomètre M à air comprimé (190) fixé à la planchette métallique qui porte le piézomètre et il devient facile de déduire de la réduction, subie par le volume de l'air dans le tube M, la valeur en atmosphères de la pression transmise au liquide du piézomètre. De plus, la position finale de l'index de mercure en I donne la mesure de la diminution totale de volume éprouvée par ce même liquide.

1023. **Calcul de l'expérience.** — On aurait donc ainsi les deux éléments nécessaires pour estimer le coefficient de compressibilité, si une cause d'erreur n'intervenait pas dans cette expérience. Le vase de verre, qui forme le piézomètre, n'est-il pas soumis aussi à la même compression que le liquide, et dès lors le changement de volume, qu'il éprouve, ne doit-il pas rendre fautive l'estimation directe, que l'on a dû faire, du volume final du liquide ? En un mot, le volume apparent du liquide représente-t-il exactement son volume réel ? On démontre, par le raisonnement, que la variation de la capacité intérieure du piézomètre est égale au changement de volume, que subirait un noyau solide de la même substance, qui remplirait exactement cette capacité, et qui serait soumis par tous les points de sa surface à la même pression. Si donc on appelle V le volume du piézomètre jusqu'au point occupé par l'index et par suite le volume initial du liquide qui y est contenu, si V' représente le volume apparent de la même masse liquide quand la compression exercée a atteint le degré voulu ; enfin, si l'on désigne par K' et K les coefficients de compressibilité cubique du verre et de l'eau, par P la pression finale en atmosphères, le volume réel du liquide comprimé sera $V(1-KP)$. Le volume réel de la portion du vase qui contient le liquide au moment où la compression voulue est exercée sera $V'(1-K'P)$;

on aura donc l'égalité V (1—KP) = V' (1—K'P), d'où l'on pourra déduire K, si toutefois K' est connu à l'avance.

1023 *bis*. **Perfectionnement de la méthode.** — Mais par malheur, la valeur de K' n'a été établie par aucune expérience certaine. Aussi, après que la méthode d'Œrsted eut été reprise et perfectionnée par MM. Colladon et Sturm, M. Regnault a dû encore revenir sur la question et, en faisant, sur le piézomètre lui-même, la détermination du coefficient de compressibilité de la matière qui forme ce piézomètre, il a obtenu des résultats numériques qu'on doit considérer comme plus exacts que ceux de ses devanciers.

Voici les nombres qui se déduisent de ses expériences et de celles de M. Grassi qui s'est servi du même appareil que lui :

COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITÉ DES LIQUIDES.

Eau à 0°	50	millionièmes.
Eau à 11°	48	—
Alcool à 7°	83	—
Éther à 0°	111	—
Mercure à 0°	3	—

1024. **Choc des corps.** — La diminution de volume, au lieu d'être provoquée dans les corps par l'emploi d'une force étrangère agissant d'une manière continue, peut encore être déterminée par une action mécanique, qui ne persiste que pendant un temps très-court, et le corps comprimé, quand il est élastique, reprend alors presque aussitôt et de lui-même son volume primitif. Ce nouveau cas se présente dans le choc des corps. Il est utile de rappeler ici succinctement les lois qui concernent le choc des corps, quoique la question se rattache plutôt à la mécanique qu'à la physique : nous allons trouver en acoustique une application fréquente de ces lois.

Lorsque deux corps, animés de vitesses différentes, se rencontrent, il y a choc. Si les deux corps sont mous et ductiles, des boules d'argile ou de cire par exemple, ils se déforment d'une manière permanente au moment du choc, et, restant accolés l'un à l'autre, ne forment plus qu'un système unique animé d'une certaine vitesse qui dépend des masses et des vitesses primitives des deux mobiles. Si les deux corps sont parfaitement élastiques, la déformation, qu'ils subissent au moment du choc, n'est que momentanée : ils reprennent d'eux-mêmes leur volume initial et cheminent ensuite chacun séparément avec une vitesse propre qui peut être très-différente de celle du mobile avant le choc.

1025. Voici les résultats principaux concernant le choc des corps élastiques qui ont été déduits du calcul et vérifiés par l'expérience.

Si deux masses égales, parfaitement élastiques (deux boules d'ivoire de même diamètre) cheminent en sens contraire, suivant la même ligne, avec des vitesses différentes, au moment du choc elles échangent leurs vitesses de telle manière que chacune revient sur ses pas en prenant la vitesse que l'autre possédait. Dans le cas particulier, où l'une des masses serait en repos, celle-ci prendrait donc, au moment du choc, la vitesse de la masse en mouvement, qui retomberait elle-même au repos.

1025 *bis*. Le résultat, que nous venons d'énoncer, permet d'expliquer facilement l'expérience suivante qu'on exécute depuis longtemps dans les cours : A une même barre transversale (*fig.* 471), sont suspendues à l'aide de fils de soie des billes d'ivoire de même diamètre qui se juxtaposent sans se comprimer mutuellement, leurs centres se trouvant placés sur une même ligne droite horizontale. Si l'on écarte la bille B de sa position d'équilibre, pour la laisser ensuite retomber comme un pendule, on constate qu'aucune des billes intermédiaires ne se déplace d'une manière apparente à l'instant où le choc se produit ; la bille A se met seule en mouvement en prenant un écart à peu près égal à celui qu'on avait déterminé dans la bille B. Mais A retombe à son tour, le choc se transmet et la bille B seule se déplace, et ainsi de suite. Les résultats de cette expérience sont une conséquence de ceux que nous avons fait connaître au § 1025 : la seconde bille, étant immobile et possédant la même masse que A, a pris toute sa vitesse quand le choc a eu lieu, et B est tombée au repos ; semblablement la troisième s'est emparée de la vitesse de la seconde, qui n'a pu se mettre en mouvement ; la même communication de mouvement s'est poursuivie jusqu'à la bille A qui, n'étant en contact avec aucune masse nouvelle, s'est mue en prenant la vitesse que B possédait au moment où elle est tombée.

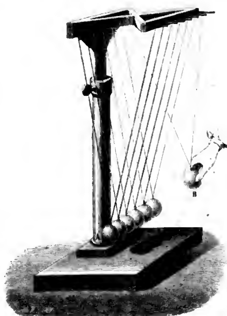


Fig. 471.

1026. Si le choc a lieu entre des masses différentes, que l'une d'elles, par exemple, puisse être considérée comme infiniment grande par rapport à l'autre, et qu'en même temps elle soit en repos, la masse en mouvement reviendra sur ses pas, à la suite du choc, en prenant une vitesse égale mais de signe contraire à celle qu'elle possédait auparavant. C'est ainsi qu'une bille d'ivoire, qu'on laisse tomber d'une certaine hauteur sur un plan de marbre, remonte sensiblement en rebondissant à la hauteur d'où elle était partie; elle reviendrait exactement à la même hauteur, si l'ivoire et le marbre étaient des corps parfaitement élastiques et si le mouvement de la bille s'accomplissait dans le vide.

CHAPITRE II

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON.

1027. L'acoustique est la partie de la physique, qui s'occupe de l'étude du son. Elle recherche les phénomènes, qui s'accomplissent dans un corps qui résonne, les actions qui provoquent ou modifient cette résonnance; elle étudie le mode suivant lequel le son se transmet du corps sonore jusqu'à l'observateur; enfin elle s'efforce de rendre compte des phénomènes physiques qui influent sur les qualités des sons, qualités qui servent à les différencier les uns des autres.

I. — PRODUCTION DU SON.

1028. **Premier principe. — Vibrations d'un corps sonore.** — Les molécules de tout corps, qui rend un son, exécutent, de part et d'autre de leur position d'équilibre, de petits mouvements qui s'accomplissent avec une grande rapidité et qu'on appelle *mouvements vibratoires*. Des expériences nombreuses démontrent ce fait général; indiquons-en d'abord qui l'établissent pour les corps solides.

1029. **Vibrations d'une corde.** — Une corde blanche et tendue est-elle placée devant un fond noir (*fig.* 472)? Si, en la pinçant vers son milieu, on l'écarte de sa position d'équilibre, on reconnait qu'abandonnée à elle-même, elle rend un son qui persiste pendant un certain temps. Tant que le son, qu'elle fait entendre, est saisissable par l'oreille, le doigt, qui l'effleure, la sent frémir; en même temps aussi, à la place de la ligne

blanche, très-nette, qui ressortait sur le fond noir, l'observateur voit une corde moins lumineuse, mais renflée de plus en plus, à mesure que la partie, qu'il considère, est plus voisine du milieu. Les diverses positions successives que la corde occupe dans ses vibrations rapides, s'aperçoivent simultanément à cause de la persistance des impressions sur la rétine, et la grandeur du renflement accuse l'amplitude de l'oscillation.



Fig. 472.

1030. **Ventres, nœuds.** — Les points, où les vibrations du corps sonore s'exécutent avec la plus grande amplitude, ont reçu le nom de *ventres*. La figure 472, qui est la reproduction fidèle de l'expérience, montre de suite aux yeux de l'observateur qu'un ventre s'est formé au milieu V_1 de la corde. Mais la vue de l'expérience nous conduit aussi à une considération nouvelle : que l'on observe les extrémités N_1 et N_2 de la corde vibrante, on reconnait qu'elles ne présentent aucun renflement qui manifeste un mouvement vibratoire ; elles restent donc absolument immobiles. Dans un corps, qui rend un son, il en est toujours de même, il est certains points qui demeurent au repos et auxquels on a donné le nom de *nœuds*.

1031. **Vibration simple, vibration double.** — Lorsque la corde passe d'une de ses positions extrêmes à la position opposée, on dit qu'elle exécute une *vibration simple*. Le mouvement, qu'elle fait pour aller d'une position extrême à l'autre et ensuite pour revenir à sa position première, est dit une *vibration double*.

1032. **Verge vibrante.** — Une verge NV (*fig.* 473), fixée à l'une de ses extrémités entre les deux mâchoires d'un étau, rend un son quand on l'écarte de sa position d'équilibre. En l'infléchissant d'une certaine quantité, le mouvement vibratoire s'observe comme celui de la corde, et peu à peu son amplitude diminue jusqu'à devenir nulle.



Fig. 473.

1033. **Diapason.** — Un diapason, qui est constitué par une verge courbe ABC (*fig.* 474) rend un son quand on écarte les deux branches à l'aide d'une tige cylindrique de grosseur convenable qu'on fait passer entre elles. On voit alors les deux branches exécuter rapidement un mouvement de

va-et-vient de part et d'autre de leurs positions normales, et en même temps un son très-pur se fait entendre. On peut obtenir une trace permanente des vibrations du diapason, en se servant d'une pointe fine qu'on fixe perpendiculairement au plan de vibration. Il suffit de faire glisser le long de cette pointe, et de bas en haut, une lame de verre recouverte de noir de fumée; la pointe, qui oscille, trace des sinuosités sur le verre qui se déplace; chacun des traits ainsi obtenus correspond à une vibration simple.

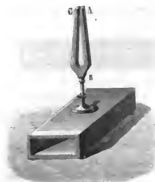


Fig. 474.

1034. **Vibrations d'un timbre.** — Un timbre hémisphérique (*fig.* 475), porté sur un pied immobile, est attaqué par un archet; aussitôt il rend un son, et la pointe P, qui était placée d'avance près du timbre et à une très-petite distance de sa surface, est choquée par lui. On constate aisément la production des chocs, car, outre le son rendu par le timbre, une série de petits bruits est perceptible à l'oreille, et leur existence prouve que les points du timbre, situés, à l'origine, auprès de la pointe, viennent la frapper à coups répétés. Toutefois, toutes les parties du timbre ne sont pas en mouvement; il en est qui sont en repos; la pointe placée près d'elles n'est plus choquée quand le corps résonne.


Fig. 475.

1035. **Vibrations d'une plaque.** — La plaque horizontale AB (*fig.* 476), fixée en son milieu, est recouverte d'une légère couche de sable; on la frotte avec un archet sur l'un de ses bords, dans une direction à peu près perpendiculaire à son plan; un son est produit, et l'on voit aussitôt les grains de sable sautiller. Mais sur certaines lignes, le sable s'accumule et finit par rester immobile. Il est chassé des parties vibrantes de la plaque pour se rassembler sur les parties qui ne vibrent pas et qu'on nomme *lignes nodales*.

Des dessins, analogues à celui que représente la figure, sont tracés par les grains réunis. Les figures obtenues dépendent de la forme de la plaque et du son qu'elle rend pendant l'expérience.

1036. **Production du son par les liquides.** — La production du son, par le mouvement vibratoire des molécules liquides, a été mise hors de doute au moyen de la *sirène*, petit instrument fort ingénieusement combiné que nous décrirons bientôt (1063). Dans cet appareil, qui est complétement immergé dans l'eau, une colonne de

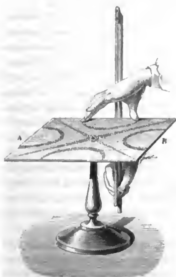


Fig. 476.



Fig. 477.

liquide provenant d'un réservoir élevé s'échappe par saccades, à des intervalles de temps très-rapprochés, à travers les orifices circulaires, dont une plaque métallique est percée. Il y a ainsi une suite de chocs alternatifs de l'eau contre l'eau, et dès lors production d'un son. La sirène chante dans l'eau, et c'est là même l'origine du nom donné à cet instrument.

1037. **Production du son par les gaz. Colonne d'air vibrante.** — Un tuyau rectangulaire (*fig.* 477) a l'une de ses faces formée par une paroi de verre; il est placé verticalement sur le sommier S d'une soufflerie, au moyen de laquelle on peut chasser le vent. Le son se produit et la petite

membrane M tendue sur un cadre et suspendue dans l'intérieur du tuyau sonore, entre en vibration. Le fait du mouvement vibratoire est rendu manifeste par le sautillement du sable à la surface de la membrane. La colonne d'air contenue dans le tuyau ne vibre pas cependant tout entière : certaines tranches gazeuses sont sans mouvement, car, en tâtonnant, on arrive à placer la membrane à une telle profondeur, que le sable reste en repos.

II. — PROPAGATION DU SON.

1038. **Second principe.** — Le son se transmet du corps sonore, jusqu'à l'oreille de celui qui l'entend par l'intermédiaire des milieux pondérables.

1039. **Le son ne se propage pas à travers le vide.** — Dans les circonstances habituelles, c'est par l'air que le son se propage : l'expérience suivante le montre clairement. Un mouvement d'horlogerie soulève, à des époques très-rapprochées, un marteau M (*fig.* 478) qui vient frapper sur un timbre T, si bien qu'il se produit un bruit éclatant. L'appareil étant placé sous le récipient d'une machine pneumatique, le son ainsi engendré s'entend encore très-bien, si le vide n'est pas fait ; mais à mesure qu'on enlève l'air, l'intensité du son diminue, et enfin, quand le vide est à peu près obtenu, on voit encore le marteau frapper le timbre, mais on ne perçoit plus aucun son. Aussitôt que l'on fait rentrer l'air, le bruit se fait entendre de nouveau aussi intense qu'au début de l'expérience.

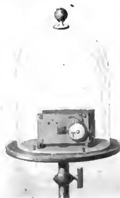


Fig. 478.

Le son ne cesse nettement que si le mouvement d'horlogerie est porté sur du liége, comme cela est représenté par la figure, ou bien encore repose sur un coussin de coton, ou enfin s'il est suspendu à une corde à brins peu serrés ; en un mot ce mouvement doit être séparé de la cloche et de la platine par un corps mou ou filamenteux, et plus généralement par une substance peu compacte formée de parties ténues qui ne sont en contact que par un petit nombre de points. Cela est nécessaire parce que les corps solides eux-mêmes peuvent transmettre le son.

1040. **Les solides transmettent le son.** — La preuve, que les solides transmettent le son, est donnée par une foule d'expériences et d'observations. Tout le monde sait que les décharges lointaines d'artillerie sont parfaitement entendues si l'on place l'oreille à terre, même dans des cas où le son n'arrive pas du tout à celui qui écoute en se tenant debout. On sait que l'oreille, appliquée à l'extrémité d'une poutre, entend le moindre frottement qui se fait à l'autre extrémité.

1041. **Les liquides transmettent le son.** — Les liquides aussi transmettent le son. Un plongeur perçoit parfaitement le bruit de deux cailloux que l'on choque au sein de l'eau, et cela même à une assez grande distance.

1042. **Vitesse du son dans l'air.** — Le son, quelle qu'en soit l'origine, met un temps appréciable pour parvenir du corps sonore jusqu'à l'oreille de l'observateur. Un coup est-il frappé par un outil à une assez grande distance du point où nous nous trouvons? Nous voyons l'instrument porter le coup, bien avant que nous ne percevions le bruit qui en résulte, tandis que si l'on se rapproche convenablement, les deux effets semblent simultanés.

Des expériences directes ont été faites pour déterminer la vitesse avec laquelle le son se transmet. Les premières furent exécutées par les académiciens français en 1738; de plus récentes sont dues aux membres du Bureau des longitudes, qui employèrent d'ailleurs la méthode des premiers observateurs. Comme, à notre époque, l'art d'observer a fait de grands progrès, il est à penser que les derniers résultats obtenus sont les plus exacts; aussi parlerons-nous de préférence des déterminations faites en 1822 par Prony, Arago, Humboldt, Gay-Lussac, Bouvard et M. Mathieu.

Elles furent exécutées, pendant la nuit, par ces observateurs distribués en deux groupes: l'un des groupes se plaça sur les hauteurs de Villejuif, l'autre à côté de la tour de Montlhéry; ces deux stations sont à 18 613 mètres de distance l'une de l'autre. A une heure fixée d'avance, le feu était mis à une pièce d'artillerie sur les hauteurs de Villejuif; les observateurs de Montlhéry, attentifs, notaient sur leurs chronomètres l'instant où la lumière produite par l'inflammation de la poudre leur apparaissait; puis ils écoutaient, et notaient l'instant précis où le son parvenait à leur oreille. Après cinq minutes environ, un coup de canon était tiré à Montlhéry; les observateurs de Villejuif faisaient à leur tour deux observations identiques aux précédentes.

Les expériences ayant été répétées plusieurs fois, les résultats trouvés permirent de calculer la vitesse du son. En effet, la lumière peut être considérée comme se transmettant instantanément de l'une des stations à l'autre. Par conséquent, l'intervalle de temps, qui s'écoulait entre l'instant précis où l'on voyait la lumière et celui où l'on entendait l'explosion, cet intervalle, dis-je, donnait le temps que le son mettait à parcourir la distance comprise entre les deux stations. C'était, en moyenne, 54″,6, et comme la distance des deux stations mesure 18 613 mètres, il s'ensuit que le son parcourt $340^{m},888$ par seconde, à 16°, température de l'expérience.

1043. **Influence de la température.** — Lorsque la température change, la vitesse du son varie; quand elle s'abaisse, la vitesse du son diminue.

Les expériences, faites en Hollande à 0°, dans l'Amérique du Nord à — 40°, ont bien montré qu'il en était ainsi. Le calcul indique que à 0°, la vitesse du son est de 333 mètres, et que pour avoir la vitesse du son à une température quelconque, il faut multiplier la vitesse à 0° par $\sqrt{1+\alpha t}$; α étant le coefficient de dilatation de l'air, et t, la température au moment de l'observation.

1044. **Influence du vent.** — Dans les expériences du Bureau des longitudes, les coups de canon étaient tirés successivement des deux stations. Cette réciprocité des coups avait pour but d'éliminer l'influence du vent qui soufflait d'une station vers l'autre, et de faire que le trouble apporté par ce mouvement de l'air eût lieu en sens inverse dans les deux expériences, de manière à établir une compensation dans la moyenne. Les académiciens français avaient observé, en effet, que le vent agit pour augmenter la vitesse des sons qui suivent la même route que lui, et pour diminuer la vitesse de ceux qui marchent en sens inverse.

Mais comme la rapidité de transmission du son est très-grande par rapport à celle du transport des couches d'air (631), il s'ensuit que, dans la plupart des cas, l'influence du vent est à peu près négligeable. C'est sur l'intensité que le vent a une influence marquée. Tout le monde sait qu'à la campagne, le bruit de la cloche d'un village qu'on entend ordinairement d'un lieu assez éloigné, cesse d'être perceptible quand le vent souffle en sens contraire de la propagation du son.

1045. **Vitesse du son dans les liquides.** — La vitesse du son dans l'eau a été déterminée par MM. Colladon et Sturm, au moyen d'expériences

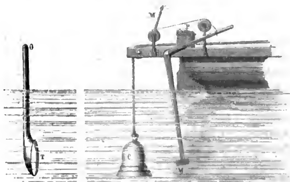


Fig. 479.

faites sur le lac de Genève. Le mode d'expérimentation était une imitation du précédent. Une cloche C (*fig.* 479), plongée dans l'eau, était mise en vibration par un marteau qui la frappait. Au moment où le coup at-

teignait la cloche, une mèche allumée M, fixée au manche du marteau, venait enflammer un tas de poudre P : une vive lumière se produisait donc au moment même du choc. Un des observateurs placé au loin sur le lac, à une distance mesurée d'avance, avait les yeux fixés vers la barque qui portait tout cet appareil, et il tenait l'oreille placée à l'extrémité O d'un cornet acoustique dont le pavillon T plongeant dans l'eau était fermé par une membrane élastique. Il notait l'instant précis où la lumière lui apparaissait; il notait ensuite l'instant où le son parvenait à son oreille par l'intermédiaire de l'eau, et des nombres obtenus on déduisait la vitesse du son transmis par le liquide. Les expériences ont donné une vitesse de 1435 mètres par seconde; c'est quatre fois et demie celle du son qui se propage dans l'air.

1046. **Vitesse du son dans les corps solides.**—M. Biot a fait des expériences sur des tuyaux de fonte assemblés entre eux, et bien serrés les uns contre les autres. Ces tuyaux étaient destinés à conduire l'eau, mais momentanément ils se trouvaient vides de liquide. Un marteau, placé à l'une des extrémités de cet assemblage, frappait contre le tuyau, et en même temps frappait sur un timbre voisin. Un observateur, placé à l'autre extrémité des tuyaux, entendait séparément : 1° le son qui arrivait par l'intermédiaire du métal; 2° celui du timbre qui arrivait par l'intermédiaire de l'air; les temps d'arrivée étant notés, il fut reconnu que le son, dans les conditions de l'expérience, se transmettait dix fois et demie plus vite par le métal que par l'air.

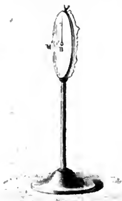
La longueur des tuyaux était de $951^m,25$ et la température de 11° ; ainsi, en $2^s,796$, le son devait se transmettre par l'air d'un bout à l'autre du tuyau. Mais l'expérience a montré que le son arrivait, par l'intermédiaire du métal, $2^s,5$, avant de parvenir par celui de l'air : donc il ne mettait que $2^s,796 - 2^s,5$ à parcourir toute la série des tuyaux, ou $0^s,296$.

VII. — THÉORIE DE LA PROPAGATION DU SON.

1047. **Vibration des milieux qui propagent le son.** — Maintenant que l'expérience nous a convaincu que le son se transmet du corps sonore jusqu'à l'observateur au moyen de l'air ou de tout autre milieu pondérable, nous avons à rechercher par quel mode la transmission s'opère, et quelle modification se manifeste dans le milieu qui sert à la propagation. L'expérience nous prouve, que ce milieu partage lui-même l'état vibratoire du corps dont les mouvements moléculaires ont donné naissance au son entendu.

1048. **Expériences.** — Une membrane tendue M (*fig.* 480) est placée verticalement et porte attaché au bord du cadre un petit pendule qui descend à une hauteur telle que la balle B se trouve au centre de ce

cadre. A une petite distance de ce petit appareil, on fait vibrer un timbre, et le pendule lancé en avant indique par ses mouvements que la membrane est en vibration. On peut également disposer la membrane dans une position horizontale, du sable fin répandu à sa surface sautille quand le timbre rend un son.


Fig. 480.

Mais sans aller chercher des expériences disposées spécialement dans ce but, tout le monde ne sait-il pas que, sous l'influence de certains bruits, les vitres exécutent des mouvements vibratoires et qu'il en est de même de toute autre plaque mince quelconque, quand elle est tendue et élastique?

1049. **Marche progressive du mouvement vibratoire.**— Les mouvements vibratoires, exécutés par le corps sonore, sont donc communiqués aux différentes couches d'air, à travers lesquelles le son se transmet. Mais aussi un ébranlement, communiqué à l'air, cesse aussitôt que la cause, qui l'a produit, cesse d'agir. Si un bruit de durée très-courte a lieu, l'observateur placé à distance, par exemple, à 340 mètres, l'entend au bout d'une seconde, puis le silence se fait, et le son parvient aux observateurs qui sont placés à la suite du premier; il passe ainsi de l'un à l'autre en parcourant les distances qui les séparent. Les couches d'air successives rentrent donc dans le repos après avoir partagé les ébranlements du corps sonore; et si l'on suit, par la pensée, une ligne droite qui parte de ce corps et que l'on considère une des oscillations qu'il exécute, on est conduit à supposer que cette oscillation est répétée par la couche d'air en contact; puis, que cette couche d'air revient au repos, que la couche suivante exécute à son tour le premier mouvement, pour rentrer au repos, et que le mouvement se propage ainsi à tous les points de la ligne considérée.

1050. **La transmission s'opère par les corps élastiques.** — Il ne suffit pas de savoir que l'air transmet le son parce qu'il vibre. Il nous est impossible de ne pas pousser plus loin nos recherches. Arrivé au point où nous sommes, personne ne peut s'empêcher de demander, en vertu de quelle propriété ces mouvements vont passer successivement de chaque couche à la suivante. La réponse fournie par l'expérience est très-nette : c'est en vertu de l'élasticité du milieu à la faveur duquel la propagation s'opère. En effet, les corps mous et sans élasticité ne transmettent pas le son, c'est un fait bien connu : les rideaux, les tapisseries empêchent le son d'aller d'une salle à la salle voisine, et dans notre expérience du timbre dans le

vide, le coussin qui soutenait le mouvement d'horlogerie et qui servait à empêcher la propagation, en a donné une preuve expérimentale. L'air transmet donc le son parce qu'il est élastique. Quelle est la conséquence de cette élasticité ?

1051. Propagation d'un ébranlement dans un milieu élastique. — Le corps sonore, qui vibre, choque l'air ou tout autre corps élastique : comment l'ébranlement va-t-il se propager de couche en couche ? Pour le montrer nettement, rappelons d'abord l'expérience déjà faite avec une série de corps solides élastiques, de billes d'ivoire (*fig.* 481), qui, placées l'une contre l'autre en contact intime, représentent les éléments séparables d'un milieu continu.

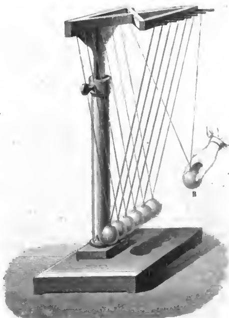


Fig. 481.

Cette expérience, avons-nous dit, montre que la première bille transmet son mouvement à la seconde, qui se soulèverait si elle n'était point en contact avec une bille d'ivoire de même masse ; au lieu de cela, le choc, qu'elle a reçu, et la déformation, qu'elle a subie, passent à la troisième, et ainsi de suite de proche en proche.

Mais si les billes successives n'ont pas pris de mouvement sensible, toutefois leurs diverses parties n'ont pas été dans un repos absolu. Chaque bille a subi une déformation : ses molécules se sont rapprochées ; puis elles ont repris leurs distances primitives. Ainsi, ce ne sont pas les billes élastiques qui se déplacent, c'est la compression qu'elles éprouvent qui se propage de l'une à l'autre.

1052. Dilatations et condensations. — Appliquons cela à la propagation du son dans l'air. Afin de simplifier et de n'avoir à considérer le phénomène que dans une direction, nous imaginerons d'abord que le corps vibrant soit à l'extrémité d'un tube prismatique indéfini et ouvert à ses deux bouts. Avec cette supposition, notre attention ne se disséminera pas

sur tout l'espace qui environne le corps sonore, et les phénomènes seront plus faciles à comprendre. Le corps sonore étant à l'une des extrémités du tube, vient en oscillant chasser l'air qui est devant lui et le pousse à l'intérieur, du moins dans une des phases de son mouvement vibratoire. Nous pouvons donc concevoir que ce corps vibrant, qui chasse l'air devant lui, soit remplacé par un piston P (*fig.* 482) auquel serait donné le même mouvement. Le piston s'enfonce-t-il dans le tube? il produira le même effet que la face antérieure du corps sonore au moment où elle choquait la lame d'air en contact.

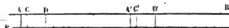


Fig. 482.

L'air étant ainsi poussé, la colonne tout entière, que le tube contient, ne se mettra pas en mouvement comme le ferait un corps absolument rigide, car l'air est compressible. Les premières molécules, celles qui touchent le piston se rapprocheront des suivantes, et tout d'abord une couche AD, d'une longueur très-petite mais finie, diminuera de volume. En vertu de sa force élastique, cette couche tendra à revenir à son volume primitif, elle le fera en comprimant l'air de la couche voisine, dont la force élastique moindre ne pourra pas résister; cette seconde couche diminuera donc à son tour de volume, tandis que la couche d'air qui la précède, celle qui a reçu la première l'ébranlement, reprendra son volume primitif et que les parties qui la constituent retomberont au repos. La seconde lame d'air sera condensée comme l'a été la première, puis la compression passera à la troisième couche, puis à la quatrième, et ainsi de suite.

Que le piston exécute un mouvement en sens inverse. La première tranche de gaz, qui remplit le tuyau, occupera un plus grand volume, elle sera dilatée et diminuera de force élastique. La seconde tranche aura dès lors une pression supérieure à celle de la première; elle se dilatera à son tour en ramenant la première au repos, et la dilatation se transmettra de proche en proche comme auparavant s'était transmise la compression.

L'expérience nous ayant montré que la vitesse du son dans l'air était de 340 mètres, il en résulte que l'état vibratoire de la première couche met une seconde, pour arriver à la tranche qui est située à 340 mètres de distance.

1053. **Propagation des mouvements vibratoires.** — Ce qui a été dit des deux mouvements de va-et-vient du piston s'applique aux mouvements vibratoires du corps sonore. Il y a plus : la théorie que nous venons d'expliquer comprend non-seulement le cas de l'excursion tout entière, qui constitue la vibration, mais encore celui de tous les mouvements élémentaires, dans lesquels on peut décomposer une vibration complète. Ainsi,

quand la première oscillation simple s'accomplit et que les molécules du corps sonore marchent toutes dans le même sens en chassant l'air vers l'intérieur du tuyau, le mouvement de ces molécules n'est pas uniforme : il ressemble à celui d'un pendule; la vitesse de chaque molécule, qui est d'abord nulle, va croissant jusqu'à ce que cette molécule atteigne sa position première d'équilibre, puis la vitesse décroît de nouveau pour devenir nulle à la limite de l'excursion. Que l'on considère les différentes phases de vibration dont il vient d'être parlé, et les condensations ou dilatations successives, qui correspondent à chacune d'elles, iront se propager le long du tuyau, l'une marchant à la suite de l'autre.

1054. **Ondes sonores.** — Le corps vibrant est-il représenté par une lame élastique AO, qui soit fixée en O, et dont la partie AB se trouve vis-à-vis du tuyau. Cette lame étant écartée d'abord de sa position d'équilibre de sorte que AB vienne en A'B', oscille aussitôt qu'elle est abandonnée à elle-même. En vertu de son élasticité, elle tend à revenir en AO, s'approche lentement d'abord de cette position, acquiert sa vitesse maximum en y arrivant, puis la dépasse et vient en OA″ par un mouvement qui se ralentit. En OA″ elle reste un instant au repos pour revenir en OA', et ainsi de suite. Au début de la première vibration, la couche d'air voisine de A'B' a été faiblement condensée, parce que la vitesse de la lame vibrante était faible : cette légère condensation se propage. A la suite il se produit une condensation un peu plus forte qui chemine comme la première, et ainsi de suite. La condensation des tranches d'air augmentera toujours et deviendra maximum lorsque la lame sera venue en AB : à partir de là, elle diminuera et sera suivie par d'autres condensations de moins en moins grandes jusqu'à ce que la position A″B″ soit atteinte. A cette époque la lame rétrograde, et les dilatations se succèdent en suivant les mêmes lois que les condensations précédentes.



Fig. 483.

1055. **Représentation graphique des condensations et des dilatations.** — La figure 483 *bis* fait ressortir aux yeux l'état de l'air du tuyau après deux vibrations simples de la lame. Elle a été dessinée d'après cette convention que les teintes les plus foncées représentent les condensations les plus considérables, les espaces blancs expriment les dilatations; les demi-teintes correspondent aux points où l'air est à la pression ordinaire.

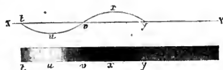


Fig. 483 *bis*.

Souvent on représente ces états variables de la condensation de l'air par

une courbe. La droite XY est dirigée suivant l'axe du tuyau, et la hauteur, à laquelle s'élève la courbe au-dessus de cette droite, donne la grandeur de la condensation au point correspondant; quand la courbe est au-dessous de XY, sa distance à cette droite indique la grandeur de la dilatation. Les deux représentations sont donc équivalentes, elles expriment les mêmes états.

1056. **Longueur d'ondulation.** — A mesure que les dilatations et les condensations, distribuées sur la longueur *ty*, progresseront le long du tuyau en marchant avec la vitesse de 340 mètres par seconde, qui est la vitesse du son, de nouveaux changements de densités résulteront du mouvement vibratoire de la lame qui continue à osciller; ces changements se représenteront par une courbe identique à la précédente et suivront les premiers avec la même vitesse, et de nouveaux arcs de courbes iront ainsi se succédant sans interruption. Au bout de *deux vibrations doubles* de la lame vibrante, l'état du tuyau sera celui que donne la figure 484, et ainsi de suite.



Fig. 484.

Si l'on appelle λ la distance à laquelle parvient le mouvement vibratoire pendant une oscillation *simple* de la lame vibrante; au bout de n oscillations simples de cette lame, $n\lambda$ sera la distance à laquelle se sera transmis le mouvement vibratoire; et si n est le nombre d'oscillations exécutées pendant une seconde, on aura $n\lambda = v$, v étant la vitesse du son; d'où $\lambda = \frac{v}{n}$. Cette grandeur λ, qui est égale à la longueur occupée par l'ensemble des tranches dilatées ou condensées pendant une vibration simple, a été nommée la *longueur de l'ondulation simple*.

1057. **Vitesse des molécules vibrantes.** — Mais outre les changements de volume qui nous ont occupé, il faut encore signaler les mouvements de l'air qui va et vient, comme la lame vibrante elle-même. Une condensation ne se propage que si les molécules gazeuses atteintes les premières se déplacent en se rapprochant de celles qui les suivent, et celles-ci ensuite se déplacent à leur tour de la même quantité. Les dilatations ne cheminent que par un mouvement des molécules en sens inverse du précédent. Ainsi, chaque molécule d'air a un mouvement oscillatoire suivant l'axe du tuyau. L'amplitude de ce mouvement est toutefois très-petite, et les longueurs, qui correspondent aux excursions des molécules de part et d'autre de leur position d'équilibre, sont négligeables quand on les compare à la longueur de l'onde sonore.

La molécule M, prise en un point quelconque du tuyau, a sa vitesse maximum quand la condensation est maximum; sa vitesse est en sens inverse et maximum quand il y a dilatation maximum. On pourra donc se servir des courbes précédemment obtenues pour avoir une représentation graphique de ces vitesses successives; les points élevés de la courbe correspondant aux vitesses dans un sens, les points de l'arc inférieur correspondront aux vitesses en sens contraire.

1058. **Propagation dans un milieu indéfini.** — Comment passer du cas de la transmission des ondes sonores dans un tuyau à celui de la propagation du son dans un milieu qui n'est limité dans aucune direction? Il suffit pour cela d'imaginer que dans tous les sens à partir du centre de l'ébranlement se produisent les changements que nous avons étudiés dans une direction. Aux mêmes distances du centre, les lames d'air seront à la fois dans la même phase de vibration, et on pourra les considérer comme formant, par leur ensemble, une surface sphérique. Le son se propagera donc dans le milieu indéfini par une série d'ondes alternativement condensées et dilatées.

1059. **Réflexion du son.** — A cette théorie se rattache celle de la réflexion du son ou celle des échos. L'onde sonore rencontre un obstacle; elle revient sur ses pas en se propageant de nouveau, en sens inverse, dans le milieu qui lui a déjà servi de véhicule; de telle sorte qu'un individu placé en avant de l'obstacle entend la reproduction du son primitif comme s'il émanait cette fois d'un centre de vibration placé en arrière de l'obstacle fixe. Les lois de la réflexion du son sont d'ailleurs celles de la réflexion de la chaleur ou de la lumière; on le prouve aisément en répétant l'expérience des miroirs conjugués. Un son faible, le tic tac d'une montre, par exemple, quand il est produit au foyer F (*fig.* 485) de l'un des miroirs, se fait entendre distinctement au foyer de l'autre, quoique la distance des deux miroirs soit de plusieurs mètres.

1060. Le cas le plus simple de la réflexion est celui où l'onde sonore vient frapper un plan CD (*fig.* 486) perpendiculaire à la direction de la propagation. L'onde est-elle condensée au moment du contact? la couche d'air qui se trouvait entre AB et CD est réduite à n'occuper que l'espace compris entre A'B' et CD; réduite ainsi, elle réagit, l'obstacle fixe s'oppose à la réaction qui ne peut plus se faire dans le sens ordinaire, et la tranche gazeuse reprend son volume primitif, en condensant, à son tour, celle qui l'a condensée d'abord, et la condensation va se propager en sens inverse de l'onde qui arrivait. Une dilatation fera de même. Le son reviendra vers son origine.

Les courbes qui figurent les condensations et les dilatations après la réflexion, ne seront donc autres que les courbes $tu_1v_1x_1y_1$ qui auraient dû les représenter, si l'obstacle n'avait pas existé. Mais ces courbes doivent être

repliées sur elles-mêmes aux points où se trouve l'obstacle et on a les courbes figuratives *tuvxy*.

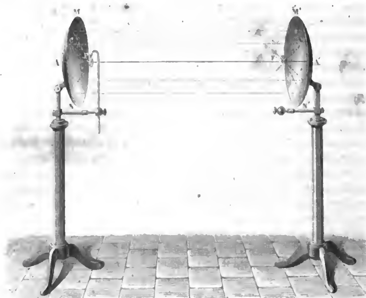


Fig. 485

Mais il n'en est pas de même des courbes qui représentent les vitesses ;

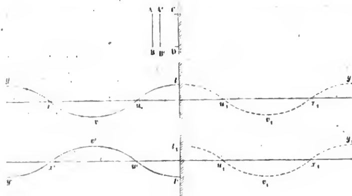


Fig. 486.

il faudra non-seulement les replier comme les précédentes, mais encore

il sera indispensable de les faire tourner autour de la ligne XY, car pour une onde condensante qui se réfléchit, les vitesses des molécules sont dirigées en sens inverse de l'obstacle. On aura alors la figure $t'u'v'x'y'$.

CHAPITRE III.

QUALITÉS DU SON.

Un son qui se fait entendre se distingue des autres par trois caractères qui constituent ce que l'on appelle ses qualités : l'*intensité*, la *hauteur* et le *timbre*. Ces qualités seront maintenant l'objet de notre étude.

INTENSITÉ.

1061. L'intensité du son dépend de l'amplitude des vibrations ; une corde tendue peut servir très-bien à le démontrer. Que cette corde soit très-peu écartée de sa position d'équilibre, le son qu'elle produira sera peu intense et le renflement de la corde peu considérable. Au contraire, la corde est-elle écartée le plus possible de la position d'équilibre, les vibrations ont plus d'amplitude, et en même temps l'intensité du son est augmentée. La démonstration, faite au moyen de la corde, se répéterait toute semblable, soit avec une plaque, un tuyau ou un timbre, et l'on trouverait toujours que, toutes les fois que les excursions des molécules vibrantes ont moins d'étendue, le son devient moins intense

HAUTEUR DU SON. — NOMBRE DE VIBRATIONS CORRESPONDANT A UN SON DONNÉ.

1062. Un chant, quel qu'il soit, est composé de sons que nous distinguons les uns des autres par une qualité spéciale : l'*acuïté* ou la *gravité*. Cette qualité est tout à fait indépendante des autres. Une même voix peut donner deux notes, qui résonnent avec la même intensité, c'est-à-dire qui peuvent être entendues à la même distance extrême par le même individu, et dont cependant la hauteur soit très-différente. De même une note peut

éclater avec force et retentir à une grande distance, ou bien résonner presque tout bas; une oreille musicale reconnaitra parfaitement la même note, dans les deux sons émis. Enfin deux instruments, qui diffèrent par le timbre au point que même les plus inhabiles ne s'y trompent pas, peuvent faire entendre des notes équivalentes en musique, et qui seront dites *à l'unisson*.

Cette qualité spéciale, la hauteur du son, a été étudiée par les physiciens, qui ont recherché dans le corps sonore quelle était la cause des sensations différentes que nous traduisons par les mots : Tel son est plus grave; tel son est plus aigu. Ils ont résolu la question et prouvé, par des expériences très-décisives, que la hauteur du son dépend du nombre des vibrations exécutées en un temps donné. L'acuïté du son augmente quand le nombre de vibrations par seconde devient plus grand.

La solution de cette question date d'une époque déjà bien reculée; car il faut remonter jusqu'aux philosophes grecs pour retrouver les premières connaissances sur ce sujet. Mais si les résultats de leurs recherches nous sont parvenus, il ne nous reste que des récits inacceptables sur les méthodes qu'ils employaient.

Dans les premières années du dix-septième siècle, le P. Mersenne mit en œuvre des procédés rigoureux d'investigation, et démontra les lois, qu'on avait admises, jusque-là, sans qu'aucune preuve expérimentale bien décisive en eût été fournie. A propos des cordes vibrantes, nous dirons un mot du procédé qu'il employa. Pour le moment, nous décrirons les instruments et les méthodes qui doivent être préférés : la sirène, la roue dentée, la méthode graphique.

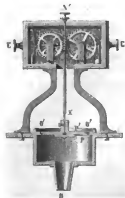


Fig. 487.

1063. Sirène. — Description. — La sirène, imaginée en 1819 par Cagniard de La Tour, se compose de deux plateaux circulaires P, P' (*fig.* 487) presque en contact l'un avec l'autre, et dont les axes se confondent. Chacun d'eux est percé d'un même nombre de trous O', O' équidistants, distribués sur une circonférence d'une grandeur déterminée, dont le centre est sur l'axe commun. Le plateau inférieur fixe forme le fond d'une boîte, dans laquelle on insuffle de l'air au moyen d'un tuyau B qui s'y trouve adapté. Le plateau supérieur, soutenu par un pivot XX', est mobile autour de son axe. L'air insufflé passe par les ouvertures pratiquées au fond de la boite et vient choquer l'air extérieur quand les trous des deux plateaux se correspondent; au contraire, cet air reste emprisonné dans la boite quand les

ouvertures de l'un et de l'autre plateau ne sont pas en regard. Par la rotation du plateau mobile, ces deux phénomènes ont lieu successivement à des intervalles de temps qui peuvent être très-rapprochés.

1064. **Vibrations de l'instrument.** — Quand le courant d'air sort et s'échappe à la fois par toutes les ouvertures, un choc a lieu contre l'air extérieur : de là une vibration; quand le courant d'air cesse de sortir, l'air qui, emporté d'abord par sa vitesse acquise, laisse un vide partiel derrière lui, revient sur lui-même : une vibration nouvelle et en sens inverse a lieu. Les plateaux sont-ils percés de dix ouvertures; à chaque tour du plateau mobile dix coïncidences et dix interruptions se succéderont, et en somme vingt vibrations simples se seront produites et propagées dans l'air extérieur.

Le procédé employé pour faire tourner le plateau mobile est des plus simples et des plus ingénieux. Cagniard de La Tour a utilisé le vent même qui servait à produire le son. A cet effet, les ouvertures ne sont pas perpendiculaires aux plateaux : celles du plateau fixe sont inclinées dans un sens, celles du plateau mobile en sens contraire; leur direction est cependant toujours perpendiculaire aux rayons de la circonférence sur laquelle ils sont distribués. La figure 488 montre la coupe des deux plateaux par un plan passant par la ligne DE. L'air qui sort de la boîte frappe les bords de l'ouverture supérieure, détermine le mouvement d'abord, l'accélère ensuite, et selon que l'on chasse l'air avec une pression plus ou moins grande, on obtient une rotation dont la rapidité peut être amenée à la valeur convenable, pour que le son acquière l'acuité que l'on désire.



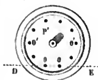


Fig. 488.

1065. **Compteur de la sirène.** — Le son étant obtenu, il faut compter le nombre de vibrations qui lui correspond ; et le compte sera fait si l'on détermine le nombre de tours que le plateau exécute par seconde. Autant de tours, autant de fois 20 vibrations.

Un appareil que l'on nomme *compteur* est disposé à cet usage. L'axe de la sirène est travaillé à sa partie supérieure en forme de vis sans fin V (*fig.* 487), qui engrène à volonté avec une roue dentée R à l'axe de laquelle est adaptée une aiguille mobile sur un cadran. La roue a-t-elle 100 dents, le cadran porte 100 divisions, et pour chaque tour de la vis sans fin, la roue avançant d'une dent, l'aiguille marche d'une division. Cette première disposition permet de compter jusqu'à 100 tours du plateau ou 2 000 vibrations de l'air : il faut pouvoir aller plus loin. Dans ce but, à l'axe de la roue dentée est fixée une tige métallique ou bras *a* qui tourne avec elle, et

qui, à chaque tour, rencontre une dent d'une roue R' dont l'axe est parallèle à celui de la roue R. Le bras, pour passer, force cette roue d'avancer d'une dent, et cette nouvelle rotation est aussitôt accusée sur un second cadran par le déplacement d'une aiguille. Sur le second cadran on lit donc combien de fois le plateau a fait 100 tours ; ainsi l'on peut poursuivre l'expérience pendant un temps assez long et compter un nombre de vibrations considérable.

Mais le compteur ne doit pas marcher toujours; il doit être arrrêté pendant qu'on effectuera les tâtonnements nécessaires pour faire rendre à la sirène le son voulu et à d'autres moments encore. Afin qu'il ne fonctionne qu'en temps utile, les axes des roues sont portés par une boîte que l'on peut déplacer légèrement en la poussant au moyen de boutons C, C'; si l'on pousse la boite d'un côté en appuyant sur le bouton C', la vis sans fin cesse d'engrener ; si l'on appuie sur C, la vis sans fin et la roue reviennent en prise.

1066. **Marche d'une expérience.** — Pour faire usage de la sirène, on désengrène la roue du compteur; et l'on note la position des aiguilles, que nous supposerons toutes deux au zéro pour plus de simplicité. L'instrument est alors fixé sur une soufflerie qui envoie de l'air dans la boîte; le plateau supérieur prend un mouvement, qui s'accélère peu à peu. Quand le son que l'on veut produire est obtenu, on modère le vent, pour conserver la note que l'on entend; on tâtonne, et lorsqu'on se sent maître de maintenir le son à la même hauteur, on presse d'une main le bouton C de la sirène que l'on tient d'avance; et en même temps de l'autre main l'on pousse le bouton d'un compteur à secondes, qui marque l'instant précis où les roues ont engrené. On maintient le son aussi longtemps qu'on le peut, et quand on veut terminer, on pousse à la fois le bouton C' de la sirène pour désengrener, et le bouton du compteur à secondes. L'expérience est terminée. Par exemple, lit-on sur le compteur de la sirène que l'aiguille chargée de marquer les centaines de tours est à la division 10 : cela indique que le plateau a fait 1 000 tours correspondant à 20 000 vibrations; l'aiguille qui marque les tours est-elle à la division 54 : cela veut dire qu'il faut ajouter 54 fois 20 vibrations au nombre précédent. Le total des vibrations est 21 080. Si l'expérience a duré 40 secondes le nombre de vibrations correspondant au son donné est $\frac{21080}{40}$ ou 527 par seconde.

Comme le nombre de tours marqué par les aiguilles est estimé à un tour près, celui des vibrations l'est à vingt vibrations près. L'erreur peut paraître grande; mais on l'atténue autant qu'on veut en prolongeant la durée de l'expérience. La plus grande difficulté, dans ce cas, consiste à maintenir le son que rend l'instrument à la même hauteur pendant tout le temps voulu.

1067. **Roue dentée.** — La sirène était déjà connue, lorsque Savart, en 1830, inventa, pour des expériences spéciales, un appareil qui est, sans aucun doute, bien inférieur au précédent, mais qui pourtant peut servir au même but; en tout cas, il est intéressant par son principe : on l'appelle la roue dentée de Savart. Il se compose d'une roue dentée R (*fig.* 489), tournant autour d'un axe avec plus ou moins de rapidité, à la volonté de l'expérimentateur qui la met en mouvement au moyen d'une manivelle et d'une corde sans fin S. Les dents de la roue viennent frapper chacune à leur tour contre le bord d'une carte C, que l'on maintient. A chaque dent, qui infléchit la carte, une vibration a lieu, puis la dent s'éloigne, abandonne le corps élastique à lui-même, et une nouvelle vibration a lieu en sens inverse. Au total, à chaque dent, qui passe, il faut compter deux vibrations. Un appareil semblable à celui de la sirène permet de compter le nombre de tours de la roue dentée, et l'expérience, d'où l'on déduit le nombre de vibrations correspondant à un son, se fait de même.

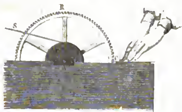


Fig. 489

L'infériorité de cet instrument tient à ce que sa masse doit être nécessairement considérable : ce n'est pas un instrument, c'est une énorme machine; tandis que la sirène, légère et portative, remplit le but proposé sans embarras. En outre, il est toujours à craindre que la carte frappée par une dent et écartée par le choc ne soit pas revenue lorsque la dent suivante arrive. De plus, il est nécessaire de le dire, il faut deux expérimentateurs habiles pour manœuvrer la roue dentée : l'un qui tourne la manivelle et dont l'oreille doit être bien exercée et les mouvements bien réguliers, et l'autre qui manœuvre les deux compteurs aux temps convenables. Ainsi, avec la roue dentée, on ne gagne rien en précision, on peut perdre même : on perd certainement au point de vue de la commodité de l'appareil. Savart savait tout cela d'ailleurs, et il n'employait la roue dentée que dans les expériences où il voulait produire des sons très-aigus et en connaître le nombre de vibrations correspondant. Il ne put pas trouver dans ce but d'instrument meilleur que la roue dentée, dont les dents ont frappé sur la carte jusqu'à 24 000 fois par seconde.

1068. **Méthode graphique.** — Voici une nouvelle méthode, qui, peu employée jusqu'à ces dernières années, semble être destinée à remplacer toutes les autres. Sa précision est grande, son emploi facile ; elle n'exige qu'un mouvement de rotation bien réglé ; et les progrès de la mécanique appliquée permettent de nos jours de satisfaire à une telle exigence.

Au corps vibrant D (*fig.* 490) on fixe une tige aiguë P d'une masse négligeable, et devant cette tige, qu'on rend horizontale, on fait passer la tranche d'une roue R horizontale aussi, qui tourne d'un mouvement uniforme, en faisant, je suppose, un tour par seconde. Le corps vibrant étant disposé de telle sorte que ses mouvements s'exécutent dans un plan parallèle à celui de l'axe de rotation AA', il est clair que sur la tranche de la roue recouverte de noir de fumée, une ligne ondulée sera tracée par la pointe. Autant cette ligne aura de sinuosités, autant le corps sonore aura exécuté de vibrations simples. L'expérience faite, il suffira de compter le nombre de ces sinuosités qui se dessinent sur une moitié, un tiers de la roue pour qu'en doublant, triplant, on ait le nombre de vibrations par seconde qui correspondent au son produit.

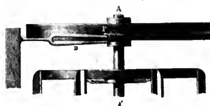


Fig. 490.

1068 *bis*. **Quatrième méthode.** — A ces trois méthodes, nous devons en ajouter encore une autre; mais comme cette dernière repose sur les résultats obtenus par les trois précédentes, il faut d'abord faire connaître ces résultats.

1069. **Nombre de vibrations correspondant aux diverses notes de la gamme.** — La gamme est formée de sept notes, dont la musique fait usage et que le physicien a étudiées à son point de vue en cherchant le nombre de vibrations qui correspond à chacune d'elles. Il est résulté de cette étude le tableau suivant qui donne le rapport entre le nombre des vibrations d'une note quelconque de la gamme et le nombre de vibrations qui correspond à la première.

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut.*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Commence-t-on la gamme par une note telle que le nombre de vibrations correspondant soit de 522 par seconde, on aura pour les autres notes :

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut.*
522	$522 \times \frac{9}{8}$	$522 \times \frac{5}{4}$	$522 \times \frac{4}{3}$	$522 \times \frac{3}{2}$	$522 \times \frac{5}{3}$	$522 \times \frac{15}{8}$	522×2.

1070. *LA* **normal.** — Nous venons de commencer la gamme par une note correspondant à 522 vibrations par seconde, mais nous eussions pu prendre toute autre note pour point de départ. La gamme forme une phrase

musicale, une mélodie et comme un air quel qu'il soit, elle ne reste pas moins la même au fond qu'elle soit chantée par une voix grave ou par une voix aiguë. Toutefois, quand des instruments ou des voix doivent exécuter un morceau d'ensemble, il faut qu'ils aient un point de départ commun sur lequel tous s'accordent. De plus, le caractère d'un air change beaucoup selon qu'il est traduit avec des notes basses ou élevées; il faut donc une entente préalable sur laquelle se règlent le compositeur et les exécutants. C'est ce que l'on a fait, et dans tous les pays, les musiciens se règlent sur un diapason qui donne une note *la* de hauteur déterminée, et sur laquelle les instruments sont accordés. Cette note, qui devrait être invariable et la même pour tous les pays, a par malheur subi dans la suite des temps des variations assez notables. Aujourd'hui en France, un arrêté du ministre d'État a fixé le *la* normal à un nombre de vibrations égal à 870 vibrations simples à la seconde. Dans la commission qui a été appelée à délibérer sur le sujet, c'était M. Lissajous qui, à bon droit, représentait la science de l'acoustique.

1071. **Notation des diverses gammes naturelles.** — On est convenu, d'après Sauveur, de représenter par ut_1, l'*ut* le plus grave de la basse, par ut_2 celui qui le suit en montant, et qui répond à un nombre de vibrations doubles; ut_3, ut_4, ut_5, etc., sont les désignations des premières notes des gammes successives.

Or le *la* normal est celui de la gamme qui commence par ut_3; on le désigne par la_3, qui correspond à 870 vibrations par seconde: ce qui donne pour ut_3: $870 \times \frac{3}{5} = 522$ vibrations par seconde, pour ut_2: $\frac{522}{2}$ ou 261 et pour ut_1, l'*ut* grave du violoncelle $261 : 2 = 130\frac{1}{2}$. En musique on emploie des notes plus graves que cette dernière note: ut_{-1} et enfin ut_{-2} qui est la plus basse des notes usitées, répond à 32 vibrations $\frac{5}{8}$.

1072. **Limites des sons perçus.** — La note la plus grave, qui soit usitée en musique, correspond, avons-nous dit, à peu près à 32 vibrations par seconde: c'est ut_{-2}: la plus aiguë est la_6; elle correspond à 6 960 vibrations. L'oreille peut cependant très-bien apprécier des notes plus graves ou plus aiguës. M. Despretz a fait construire un diapason dont le son correspondait à 73 000 vibrations par seconde; l'oreille appréciait parfaitement la note, mais il faut ajouter que ce n'était pas sans souffrance.

1073. **Limites de la voix humaine.** — Enfin on a reconnu que la note la plus grave, que pouvait rendre la voix de basse-taille, était ut_1 qui correspond à 130,5 vibrations par seconde; la note la plus aiguë de la voix de soprano est ut_5 qui correspond à 2 088 vibrations. Chaque chanteur

dispose, d'ailleurs, à peu près de deux octaves dans l'intervalle que nous venons d'assigner.

1074. **Accord parfait.** — Quand on considère l'ensemble des notes de la gamme et que l'on compare les données numériques, que fournit la science, aux sensations diverses que produisent la succession ou la simultanéité de deux ou plusieurs sons différents de la gamme, on est conduit à reconnaître que les sons, qui pour l'oreille musicale s'harmonisent le mieux, sont ceux dont le rapport des vibrations est le plus simple. Ainsi les notes qui produisent la sensation la plus agréable lorsqu'elles sont produites soit simultanément, soit à un court intervalle, sont :

ut *mi* *sol*

qui correspondent à des nombres de vibrations

$$1 \quad \frac{5}{4} \quad \frac{3}{2}$$

ou bien en multipliant par 4 :

$$4 \quad 5 \quad 6$$

Leur ensemble a été appelé accord parfait majeur. Les notes *sol*, *si*, *ré*, dont les rapports des nombres de vibrations sont $\frac{3}{2}$, $\frac{15}{8}$ et $\frac{9}{8} \times 2 = \frac{9}{4}$ ou bien 4, 5, 6 en multipliant par $\frac{8}{3}$, donnent encore par leur succession l'accord parfait majeur. Enfin il en est de même du groupe *fa*, *la*, *ut*.

1075. **Tons, demi-tons.** — La comparaison des notes de la gamme a montré aussi que le rapport d'une note à la précédente donne trois fractions différentes $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$. En effet :

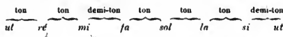
$$\frac{ré}{ut} = \frac{9}{8} \quad \frac{mi}{ré} = \frac{10}{9} \quad \frac{fa}{mi} = \frac{16}{15} \quad \frac{sol}{fa} = \frac{9}{8} \quad \frac{la}{sol} = \frac{10}{9} \quad \frac{si}{la} = \frac{9}{8} \quad \frac{ut}{si} = \frac{16}{15}.$$

L'oreille perçoit aussi trois intervalles inégaux quand les sons de la gamme sont émis successivement dans leur ordre habituel. On a appelé ton majeur l'intervalle de *ré* à *ut* caractérisé par la fraction $\frac{9}{8}$, ton mineur, celui de *ré* à *mi*, qui répond à $\frac{10}{9}$, demi-ton majeur celui qui est exprimé par $\frac{16}{15}$; mais comme le rapport des intervalles $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ est égal à $\frac{81}{80}$ et que l'oreille confond aisément deux sons qui, sur 80 vibrations, ne diffèrent que d'une vibration en plus ou en moins, on considère en musique deux intervalles de ton majeur et de ton mineur comme égaux, et on les désigne

sous le nom commun de ton. Par conséquent, on ne distingue dans la gamme ordinaire que des tons et des demi-tons, et dès lors elle se trouve constituée par cinq tons et deux demi-tons distribués comme il a été indiqué plus haut.

1076. **Dièses et bémols.** — Les sept notes de la gamme ne suffisent pas pour les besoins de l'exécution musicale. Il est nécessaire, dans beaucoup de cas, de transposer; c'est-à-dire de prendre comme point de départ de la gamme ou comme *tonique*, une note plus haute ou plus basse que celle qui a été choisie par le compositeur. Dans la nouvelle gamme ainsi commencée, il faudra évidemment que les tons et les demi-tons se trouvent à leur place habituelle. Or, ceci n'est point réalisable si l'on ne conserve que les sept intervalles ordinaires; si l'on n'intercale pas des notes nouvelles entre les notes primitives; ces notes ajoutées se nomment *dièses* et *bémols*. Quelques exemples feront comprendre la nécessité de cette intercalation.

Les intervalles, dans la gamme ordinaire, sont ainsi distribués :



Si l'on prend *sol* comme tonique, on aura la série suivante :

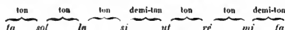


L'ordre des intervalles est conservé jusqu'au *mi;* mais à partir du *mi*, au lieu du ton et du demi-ton qui devraient se présenter successivement, nous rencontrons un demi-ton d'abord, et un ton ensuite. Il a fallu dès lors hausser le *fa* naturel, de telle sorte que l'intervalle du *fa* au *sol* suivant fût le même que celui du *si* à l'*ut* de la gamme naturelle. C'est le *fa* ainsi modifié qu'on a nommé *fa* ♯. La valeur numérique x du *fa* ♯ s'obtient aisément en partant de l'indication précédente ; il faut que le rapport du dernier *sol* à ce *fa* ♯ soit égal à $\frac{16}{15}$, qui est le rapport de l'*ut* au *si;* on aura donc :

$$\frac{3}{2} : x = \frac{16}{15}, \text{ ou } x = \frac{3}{2} \times \frac{15}{16} = \frac{45}{32}$$

et en même temps l'intervalle de *mi* à *fa* ♯ sera exactement $\frac{9}{8}$ ou un ton, comme on peut le vérifier. On verra de même qu'en prenant le *ré* pour tonique, le *fa* et l'*ut* doivent être diésés; l'*ut* ♯ s'obtiendra d'ailleurs en multipliant la valeur du *ré* par $\frac{15}{16}$. En général donc, pour diéser une note quelconque, il suffira de multiplier par $\frac{15}{16}$ la valeur de la note qui la suit

immédiatement dans la gamme naturelle. Les bémols ont une origine analogue. Prenons le *fa* pour tonique, on aura la série :



On voit que le troisième intervalle est un ton au lieu d'être un demi-ton, et le quatrième, un demi-ton au lieu d'être un ton. Il a donc fallu baisser la note *si* de manière que le rapport y de la note nouvelle ou *si* ♭ au *la* fût d'un demi-ton ou $\frac{16}{15}$. On aura par suite :

$$y : \frac{5}{3} = \frac{16}{15}, \text{ ou } y = \frac{5}{3} \times \frac{16}{15} = \frac{16}{9}$$

et de cette façon, en effet, l'intervalle du *si* ♭ à l'*ut* sera bien $\frac{9}{8}$ ou un ton. En général, pour bémoliser une note, il faudra donc multiplier par $\frac{16}{15}$ la valeur de la note qui la précède.

1077. **Tempérament.** — Ceci établi, prenons *ré* ♯ et *mi* ♭ ; les deux notes sont bien rapprochées, mais pour les musiciens elles ne sont pas égales, et le physicien peut estimer leurs valeurs numériques ; car en désignant le nombre de vibrations de *ut* par 1, la première correspond à $\frac{5}{4} \times \frac{16}{15} = 1.172$ vibration, l'autre à $\frac{9}{8} \times \frac{16}{15} = 1,167$ vibration. Quoique inégales, elles sont très-voisines et elles diffèrent d'un intervalle si petit, que l'oreille tolère aisément que l'une des notes soit prise pour l'autre; mais c'est une tolérance, et quand la note résonne avec le nombre de vibrations qui lui appartient, l'effet produit est toujours plus agréable. Avec les instruments tels que le violon et la basse, les dièses et les bémols peuvent être obtenus justes ; mais comme avec les instruments à sons fixes, tels que les pianos, les harpes, etc., il serait incommode de multiplier les cordes ou les touches, on profite de la tolérance dont nous venons de parler, et la gamme est alors divisée en douze intervalles égaux entre eux ; on a de cette façon les douze notes dont l'ensemble constitue ce qu'on a appelé la gamme tempérée.

ut	*fa* ♯ ou *sol* ♭
ut ♯ ou *ré* ♭	*sol*
ré	*sol* ♯ ou *la* ♭
ré ♯ ou *mi* ♭	*la*
mi	*la* ♯ ou *si* ♭
mi ♯ ou *fa*	*si*

1078. **Nouvelle méthode pour déterminer le nombre de vibrations qui correspond à un son donné.** — La connaissance des relations, qui

existent entre les notes de la gamme, donne une méthode nouvelle qui pourra être utilisée par une oreille exercée, pour déterminer le nombre de vibrations correspondant à un son quelconque. Cette méthode consiste à rechercher quelle place occupe dans l'échelle musicale le son à étudier; elle est prompte, mais elle exige une grande habitude de l'appréciation des intervalles musicaux.

Un instrument accordé sur le *la* normal, un violon par exemple, est entre les mains de l'expérimentateur, qui écoute le son, dont le nombre de vibrations doit être déterminé. Il suffit alors de faire résonner l'instrument jusqu'à ce qu'il parle à l'unisson du corps sonore, ou jusqu'à ce qu'il rende une note qui ait une relation musicale connue avec la note à déterminer. Ce résultat atteint, le musicien sait à quelle note de la gamme correspond le son donné; et il peut dès lors calculer le nombre de vibrations correspondant.

On n'a même pas besoin d'instrument lorsqu'on a la grande habitude de l'appréciation des intervalles musicaux, et que le son à étudier ne sort pas des limites de ceux que rendent les instruments de musique. A la simple audition, la valeur musicale de la note émise est immédiatement connue. Mais quand le son sort de ces limites, il faut par des notes intermédiaires le rattacher à celles de la gamme.

1079. **Exemples.** — Un ressort vibre dans un appareil tel que la machine de M. Ruhmkorff, et l'on veut connaître le nombre d'oscillations qu'il exécute par seconde : on écoute; l'oreille entend fa_3. On sait que ut_3 correspond à 522 vibrations par seconde, donc fa_3 correspond à $522 \times \frac{4}{3}$ ou à 696 vibrations simples; le nombre d'interruptions du courant est $\frac{696}{2}$ ou 348 par seconde.

Autre exemple : M. Despretz, voulant estimer jusqu'à quelle hauteur pouvaient monter les notes aiguës que l'oreille peut percevoir, fit construire des diapasons qui rendaient des sons de plus en plus élevés. La note la plus haute, qu'il put atteindre, correspondait à 73 000 vibrations, et il détermina ce nombre en employant des diapasons dont les notes de plus en plus hautes avaient des rapports musicaux faciles à constater; il atteignit ainsi l'octave où le son rendu se trouvait classé.

TIMBRE.

Il nous resterait à parler du timbre qui différencie des sons de même hauteur et de même intensité; mais bien que l'on ait déjà quelques renseignements sur cette question, on est encore bien loin de l'avoir résolue; nous nous abstiendrons d'insister.

CHAPITRE IV

VIBRATIONS DES CORDES ET DES TUYAUX.

1. — VIBRATIONS DES CORDES.

1080. De tout temps les hommes ont été frappés de la beauté des sons que font entendre les cordes vibrantes ; l'histoire nous apprend que chez tous les peuples, même chez les plus anciens, on a construit des instruments de musique où des cordes tendues résonnaient et reproduisaient, selon les époques, des chants encore barbares ou les œuvres musicales d'une civilisation avancée. Sans connaître les lois qui régissent les vibrations des cordes, sans prendre d'autre guide que l'oreille, les artistes sont toujours parvenus, à la suite de tâtonnements multipliés, à déterminer les longueurs, les diamètres, les tensions qu'il convient de donner aux cordes vibrantes pour qu'elles puissent rendre toutes les notes de l'échelle musicale. Il faut pourtant reconnaître que, dès les époques les plus reculées, on ne s'est pas contenté du résultat pratique : un certain nombre d'esprits ont cherché à se rendre compte des phénomènes que nous étudions aujourd'hui en acoustique, et si les philosophes grecs n'ont pas démontré les lois relatives aux vibrations des cordes, ils en ont du moins deviné les

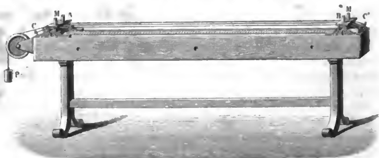


Fig. 491.

plus importantes. Dans les temps modernes, le P. Mersenne (vers 1640) a exécuté le premier des expériences très-précises sur ce sujet, et ce sont les lois découvertes par lui que nous nous proposons de faire connaître ici. Mais avant de commencer cette étude, nous décrirons l'instrument qui nous servira pour nos démonstrations ; c'est le sonomètre.

1081. **Sonomètre.** — Le sonomètre se compose d'une table de bois très-épaisse sur laquelle différentes cordes sont tendues. Chacune d'elles est fixée d'un côté par un nœud à une cheville ou *goujon* de fer C' planté à une extrémité de la table; de l'autre, elle vient s'engager dans un trou fait à une cheville mobile C adaptée à l'extrémité opposée du sonomètre. En faisant tourner sur elle-même la cheville mobile au moyen d'une clef, on peut obtenir la tension qui convient. Avec une semblable disposition, toutefois, les limites d'une corde tendue seraient mal déterminées : on ne saurait jamais avec exactitude où elle commence, où elle finit; et le nœud aurait évidemment une influence variable, selon la manière dont il serait formé. On obvie à cet inconvénient par plusieurs moyens: tantôt, à une petite distance de chaque bout, la corde est saisie par un étau métallique M dont les mâchoires, garnies de lames de plomb, sont serrées fortement; la longueur AB d'une corde homogène est ainsi nettement limitée. Tantôt, des chevalets fixes sont implantés dans le voisinage des extrémités du sonomètre, et règlent la longueur de la partie vibrante. En promenant le long de cette corde un étau mobile qui la pince, ou un chevalet qui la soutienne en un quelconque de ses points, il est possible d'en faire varier à volonté la longueur, qu'une règle divisée posée sur la face supérieure du sonomètre permet d'évaluer.

La tension exercée par le moyen des chevilles n'est pas mesurable. Quand on veut la déterminer avec précision, on se sert de poids. La corde est alors fixée à l'une de ses extrémités; à l'autre extrémité elle vient passer sur une poulie très-mobile et, après son enroulement partiel, supporte des poids qui servent à produire une tension dès lors bien exactement connue.

1082. **Lois des longueurs.** — Lorsqu'on emploie successivement des cordes de même nature, de même section et tendues par le même poids, mais de différentes longueurs, les nombres de vibrations varient en raison inverse des longueurs. X.

Trois méthodes peuvent être employées pour démontrer cette loi :

Le P. Mersenne tendit, entre deux points fixes, une corde assez longue pour que, sous l'action des poids qui agissaient sur elle par voie de traction, elle exécutât des vibrations lentes et faciles à compter. Il observa que le nombre de vibrations était double, quand la corde, toujours tendue par les mêmes poids, était réduite à la moitié.

Mais dans les expériences du P. Mersenne, les cordes vibraient trop lentement pour rendre un son perceptible, et, quoiqu'il soit assez légitime d'étendre la loi découverte au cas des cordes qui, plus courtes et plus tendues, vibrent assez vite pour émettre un son, il vaut encore mieux opérer sur les cordes sonores elles-mêmes.

Aujourd'hui que des méthodes exactes nous ont fait connaître le nombre de vibrations qui correspond à chaque note de la gamme, un procédé très-

simple peut être employé. On fait vibrer une corde tendue sur le sonomètre, et l'on écoute le son produit ; puis on réduit à moitié la longueur de la corde, et l'on reconnait que le son obtenu est l'octave aiguë du premier : si le premier était ut_3, le second est ut_4 et répond à un nombre de vibrations double.

1083. **Longueurs successives que doit avoir une corde, dont la tension est constante, pour donner les différentes notes de la gamme.** — La loi précédente permet de prévoir quelle est la longueur, que doit avoir une même corde, pour produire les différentes notes de la gamme. Par exemple, la corde vibrant tout entière donne l'*ut*, quelle longueur de la même corde faudra-t-il employer pour obtenir le *sol?* Le rapport des nombres de vibrations correspondant au *sol* et à l'*ut* est égal à celui de $\frac{3}{2}$ à 1 : le rapport des longueurs des cordes qui fourniront ces nombres de vibrations, sera inverse, c'est-à-dire celui de $1 : \frac{3}{2}$ ou $\frac{2}{3}$. Ainsi, la longueur de la corde qui rend le *sol* doit être les $\frac{2}{3}$ de la longueur de celle qui sonne l'*ut*. On est conduit, en raisonnant de la même manière, aux nombres inscrits dans le tableau suivant :

Notes	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
Longueurs correspondantes d'une même corde	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$

Ces résultats se vérifient directement sur le sonomètre.

1084. **Application de cette loi.** — La loi des longueurs est l'une de celles, dont il est fait usage le plus souvent en musique. Le violon, qui n'a que quatre cordes, ne pourrait rendre que quatre sons différents si l'on faisait toujours vibrer ces cordes tout entières. Mais l'exécutant a la faculté de poser ses doigts à diverses distances sur chacune d'elles, il fait ainsi varier la longueur de la partie vibrante et obtient des sons très-divers. De même le constructeur de harpes, de pianos, etc., donne aux cordes de ces instruments des longueurs telles qu'en vibrant, elles font entendre les différentes notes de la gamme.

1085. **Loi des diamètres.** — Les nombres des vibrations, exécutées par des cordes vibrantes de même longueur, de même nature, et également tendues, varient en raison inverse des diamètres.

Sur le sonomètre, on tend deux cordes de même nature, en suspendant à leurs extrémités libres des poids égaux ; mais le diamètre de la première est double de celui de la seconde. On reconnaît que la corde de diamètre double rend un son qui est à l'octave grave de celui que fait entendre la corde la plus mince.

Il est difficile d'obtenir deux cordes dont les diamètres soient dans le rapport exact de 1 à 2 ; mais cela importe peu : les diamètres étant quelcon-

ques, on reconnait que les sons, rendus par les cordes, sont toujours en raison inverse de ces diamètres. On obtient d'ailleurs la valeur de ceux-ci en pesant une égale longueur de chacune des deux cordes, et la comparaison des poids donne le carré du rapport cherché.

1086. **Application de cette loi.** — Que l'on examine un instrument à cordes, on verra que les cordes sont d'inégale grosseur. Celles qui doivent donner les sons aigus sont fines, les cordes des sons graves ont une plus grande section. C'est une application de la loi des diamètres que la pratique avait depuis longtemps découverte, quoiqu'elle ne l'eût pas formulée avec précision.

1087. **Loi des tensions.** — Les nombres des vibrations fournies par des cordes de même nature, de même longueur et de même section varient proportionnellement à la racine carrée des poids qui les tendent.

Une corde A est tendue sur un sonomètre, à l'aide de masses de plomb dont le poids est connu; une corde voisine B est serrée, raccourcie, ou allongée, jusqu'à ce qu'elle rende le même son que la première. Ce résultat obtenu, on quadruple les poids qui tendent la corde A, et aussitôt elle rend un son qui est à l'octave aiguë du précédent : ce que l'on constate aisément, en le comparant au son invariable que rend la corde B qui n'a subi aucun changement.

1088. **Application de la loi des tensions.** — Les violons, les harpes, les pianos, etc., sont accordés en faisant varier la tension des cordes dont ces instruments sont munis. Voyez un violoniste : avant d'exécuter un morceau, il fait vibrer les cordes de son instrument en leur laissant leur longueur maximum et, selon que les notes qu'elles font entendre sont trop graves ou trop aiguës, il tourne les chevilles auxquelles elles sont fixées afin de les tendre ou de les détendre.

1089. **Loi des densités.** — Les nombres des vibrations rendues par des cordes de même longueur, de même section et également tendues varient en raison inverse de la racine carrée de la densité de la matière qui les forme.

La démonstration se fait en employant deux cordes : l'une de laiton, l'autre de platine, qui sont d'ailleurs égales en longueur et en diamètre, et dont les tensions sont produites par des poids égaux. Les sons rendus ne sont pas les mêmes; et si on les compare, en suivant les méthodes déjà indiquées, on trouve qu'ils correspondent à des notes dont les nombres de vibrations suivent la loi énoncée.

1090. **Application.** — Les cordes métalliques rendent des notes plus graves que les cordes à boyau de même diamètre. On profite de ce résultat dans les instruments à cordes pour faire varier plus facilement l'acuité du son que doivent rendre les cordes successives.

Les cordes filées, celles qui ressemblent par leur contexture à la grosse corde des violons, ne sont pas soumises à la loi que nous venons de faire

connaître, car de pareilles cordes ne sont pas homogènes : c'est l'élasticité seule de la substance animale qui entretient le mouvement vibratoire, et le fil métallique n'a guère d'autre rôle que de ralentir, par sa masse, les oscillations dues à la force élastique mise en jeu.

1091. **Formule.** — Toutes les lois, dont nous venons de donner la démonstration expérimentale, ont été établies depuis longtemps par l'analyse mathématique. Le problème des cordes vibrantes est en définitive un problème de mécanique. La formule qui renferme les lois énoncées est la suivante :

$$n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$$

dans laquelle π est le rapport de la circonférence au diamètre, n représente le nombre des vibrations simples que donne par seconde une corde de rayon r, de longueur l, tendue par un poids P, et formée d'une substance de densité d (le mot densité ayant le sens que nous lui avons attribué [28]).

L'expérience vérifie parfaitement, comme nous l'avons montré plus haut, les relations indiquées par cette formule. Toutefois, quand la corde est très-longue et que le poids qui la tend est faible, la vérification ne se fait plus complétement ; les nombres de vibrations ne varient pas proportionnellement aux racines carrées des poids qui tendent la corde, ils varient en raison directe des racines carrées de ces poids augmentés d'un nombre constant c. En d'autres termes, au lieu d'avoir comme le veut la théorie $\frac{n}{n'} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P'}}$ on a en réalité $\frac{n}{n'} = \frac{\sqrt{P+c}}{\sqrt{P'+c}}$. Cette divergence s'explique : elle a sa raison dans la rigidité de la corde. Celle-ci, quand elle n'est sollicitée par aucun poids, possède déjà une certaine tension qui lui est propre, et en vertu de laquelle elle est capable de vibrer. Le poids qui correspond à cette tension propre à la corde, doit donc être ajouté à P et à P'.

1092. **Harmoniques.** — Que l'on pose le doigt au milieu d'une corde

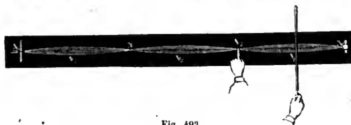


Fig. 492.

tendue, et qu'on attaque l'une des moitiés avec un archet, cette moitié vibre, et fait entendre l'octave du son qu'aurait rendu la corde vibrante

tout entière. Mais la partie attaquée par l'archet ne vibre pas seule; l'autre moitié exécute aussi des vibrations et sonne à l'unisson. De petits cavaliers de papier, posés sur cette partie de la corde, qu'on croirait au premier abord devoir être immobile, sont en effet agités et tombent dès que le son est rendu.

La corde fixée au tiers, avec le doigt, ou encore avec un chevalet, et attaquée par l'archet que l'on frotte sur la partie la moins longue, rend un son qui correspond à un nombre de vibrations triple de celui qui appartient au son fondamental, et la portion de corde, en apparence immobile, se divise en trois parties qui vibrent à l'unisson.

La figure 493 représente la corde touchée au quart; des cavaliers blancs ont été posés à chaque quart N′, N″; d'autres, noirs, ont été mis en V, V′, V″,

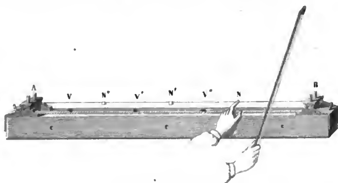


Fig. 493.

à égale distance des premiers. Un coup d'archet est donné, les cavaliers noirs sont agités et tombent; les autres restent immobiles. Avec la corde blanche sur fond noir, on voit les nœuds et les ventres se dessiner (*fig.* 492).

Une corde fractionnée comme il vient d'être dit, et qu'on fait vibrer par le segment le plus court, rend les sons 2, 3, 4, 5, etc., qu'on nomme les *harmoniques* du son donné par la corde entière. Si le plus grave des sons rendus par la corde, est appelé ut_1, les suivants sont, d'après ce que nous avons dit en étudiant la gamme au point de vue de l'acoustique, ut_2 sol_2, ut_3 mi_3, etc.

1093. Sons simultanés. — Une corde libre de vibrer tout entière, rend à la fois et le son 1 et tous les harmoniques. Une oreille exercée, qui écoute, entend très-bien ut_1, ut_2 sol_2, ut_3 mi_3 : il est difficile d'entendre au delà. Comment la corde vibre-t-elle pour rendre toutes ces notes simultanées? En même temps qu'elle va et vient en oscillant tout entière de part et d'autre, de sa position d'équilibre, elle s'infléchit, et les parties telles que N′N″ (*fig.* 493) vont et viennent individuellement pendant le mouvement d'ensemble. On le démontre en passant devant une pointe dressée sur la

corde une plaque de verre recouverte de noir de fumée; les traits sinueux que trace la pointe sont dentelés; ces dentelures prouvent qu'au mouvement d'ensemble se joignent des mouvements propres à chaque portion aliquote qui vibre séparément.

1094. Vibrations longitudinales des cordes. — Une corde frottée dans le sens de sa longueur, rend un son très-aigu. Les molécules superficielles, entraînées par le corps qui frotte, s'écartent de leur position d'équilibre, et, en vertu de l'élasticité de la corde, prennent un mouvement de va-et-vient, qui est nécessairement parallèle à l'axe, ou, comme on dit, longitudinal. Poisson a montré que le nombre de vibrations était donné par la formule :

$$N = n\sqrt{\frac{l}{\lambda}},$$

N et n représentant les nombres de vibrations longitudinales et transversales que la corde exécute, quand elle rend le son le plus grave qui corresponde à ces deux modes d'ébranlement; l exprime la longueur de la corde, et λ l'allongement qu'elle subit sous l'action du poids P qui la tend.

II. — VIBRATIONS DES TUYAUX SONORES.

Les colonnes d'air contenues dans les tuyaux peuvent être mises en vibration et former ainsi de véritables corps sonores. Les lois qui se rapportent à la production des sons dans ce cas particulier vont maintenant nous occuper.

1095. Embouchure. — Parmi les différents systèmes que l'on peut adopter pour ébranler la colonne d'air, celui qui est le plus fréquemment usité porte le nom d'*embouchure de flûte*. Ce mode spécial d'ébranlement de la masse gazeuse est obtenu par l'emploi d'une boîte dans laquelle on insuffle de l'air, au moyen d'un tube P (*fig.* 494) que l'on nomme *pied* du tuyau. L'une des parois de la boîte laisse sortir par une fente ou *lumière* L, une lame mince d'air qui va se briser contre le bord B d'une plaque fixe taillée en biseau. Ce brisement de la lame gazeuse donne naissance à une série d'impulsions se succédant avec rapidité contre la colonne d'air qui était primitivement en repos dans le tuyau, et de là résulte la production d'un mouvement vibratoire spécial qui se propage ensuite dans l'air ambiant en conservant son caractère primitif. Les praticiens donnent souvent au biseau le nom de *lèvre supérieure*. La distance qui sépare le biseau de la lumière est désignée par le nom de *bouche*, et la lèvre inférieure est constituée par la partie de la boîte que la fente traverse.



Fig. 494.

1096. **L'air vibre dans un tuyau sonore. — Preuve expérimentale.** — Déjà, au commencement de l'Acoustique, une expérience très-nette nous a servi à démontrer que l'air était en vibration dans un tuyau, lorsque celui-ci rendait un son. Nous n'avons besoin d'aucune preuve nouvelle pour admettre ce fait important; mais il est nécessaire de se demander si les parois elles-mêmes n'entrent pas en vibration, et dans le cas de l'affirmative, quelle est leur part d'influence dans le phénomène.

1097. **Influence des parois.** — L'influence des parois n'est pas douteuse, au moins pour ce qui concerne le timbre d'un son. On sait, en effet, que les instruments à vent, quand ils sont de métal, rendent un son qui accuse par son timbre une modification particulière due aux parois; tandis que la flûte, généralement construite en bois, donne, dans des conditions pareilles, un son beaucoup plus doux. Toutefois, on peut affirmer que lorsque les parois ne sont pas très-minces, leur influence est nulle sur la hauteur musicale du son. Exemple : Trois tuyaux identiques pour la forme et les dimensions, l'un de cuivre, le second de bois, le dernier de carton, font sonner la même note, quand ils sont soumis à l'action d'un même courant d'air. Au contraire, un quatrième tuyau dont les parois sont formées par une feuille de papier donnera, dans les mêmes circonstances, un son notablement plus grave.

Dans ce qui suit nous supposerons toujours que l'épaisseur des parois est suffisante, pour que l'augmentation de cette épaisseur ne puisse changer la valeur du son.

1098. **Loi des dimensions homologues.** — Lorsque l'on prend deux tuyaux dont la forme est celle de deux solides semblables, les nombres de vibrations exécutées par ces tuyaux varient en raison inverse des dimensions homologues ; telle est la loi du P. Mersenne. Pour la démontrer, on se sert de deux tuyaux cubiques T et T' (*fig.* 495) dont l'un a ses arêtes doubles de celles de l'autre. Ces deux tuyaux font entendre deux sons qui résonnent à l'octave l'un de l'autre, et c'est le tuyau le plus petit qui rend le son le plus aigu. Par conséquent, le nombre de vibrations exécutées par ce dernier tuyau est double du nombre de vibrations exécutées par le tuyau le plus grand.

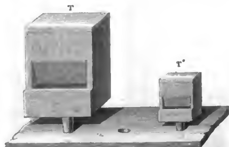


Fig. 495.

1099. **Tuyaux de grande longueur.** — Les tuyaux qui résonnent dans les instruments de musique, ont, généralement, l'une de leurs dimensions,

la longueur, très-grande par rapport aux deux autres. Que l'on examine les tuyaux d'orgues, le long tube de cuivre contourné en spirale qui forme le cor de chasse, le tube droit dans lequel souffle le joueur de flûte, et l'on reconnaîtra que les tuyaux employés d'habitude sont beaucoup plus longs que larges. C'est à Daniel Bernouilli (année 1762) qu'on doit la découverte des lois qui régissent le nombre de vibrations exécutées par de pareils tuyaux, et c'est la démonstration de ces lois qui va faire actuellement l'objet de notre étude.

1100. **Production de surfaces nodales dans les colonnes d'air des tuyaux sonores.** — Mais, avant tout, il importe d'établir clairement, par l'expérience, que toutes les fois qu'une colonne d'air vibre dans un tuyau, il existe, en certains points de cette colonne, des tranches perpendiculaires à la longueur du tuyau, qui demeurent invariablement immobiles pendant tout le temps que le même son se fait entendre. Ces tranches, dont la vitesse est constamment nulle, représentent les *nœuds de vibration*. Ainsi, qu'on fasse rendre à un tuyau d'orgue ouvert aux deux bouts et placé sur une soufflerie le son le plus grave qu'il puisse faire entendre, et au milieu de la colonne d'air ébranlée, il y aura une tranche gazeuse immobile ou un nœud. Pour le prouver, il suffit de faire descendre lentement dans le tuyau qui sonne cette petite membrane M, tendue sur un anneau de carton et saupoudrée de sable (*fig.* 496), dont nous avons déjà parlé ; on reconnait que, dans toutes les tranches, le sable sautille, si ce n'est dans la tranche située à égale distance de la bouche et de l'ouverture supérieure du tuyau ; de plus, le

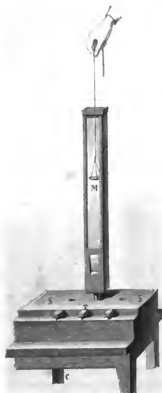


Fig. 496.


Fig. 497.

son qui avait été tout d'abord modifié dans sa hauteur, par l'introduction de la membrane, reprend son acuité primitive aussitôt que la membrane est parvenue dans cette tranche médiane. Il y a donc évidemment, en ce point, une lame gazeuse qui ne vibre pas. — *Seconde preuve :* Faites pénétrer dans l'intérieur du *même* tuyau (*fig.* 496) un piston qui s'y adapte exactement, et vous constaterez que lorsque la base inférieure du piston a atteint le milieu du tuyau, le son, qui se trouvait jusque-là altéré par la présence d'une nouvelle paroi solide, reprend aussitôt sa hauteur normale. Or, le piston a pour effet de réduire à l'immobilité la lame d'air qui est en contact avec lui ; si donc il ne modifie pas le son rendu par le tuyau quand il est parvenu au milieu de la hauteur, c'est que la lame d'air qu'il touche, à ce moment, était déjà immobile avant son introduction.

La même démonstration s'applique au cas des tuyaux fermés par leur extrémité supérieure. D'abord, il y a nécessairement un nœud au fond du tuyau, au contact de cette paroi solide qui sert à les clore ; mais, de plus, il existe, dans beaucoup de cas, des nœuds autres que ce dernier, et nous pourrons en assigner tout à l'heure les positions exactes. La figure 497 représente notre dernière expérience dans le cas où le tuyau vibrant, fermé d'abord en N_1, aurait cinq nœuds de vibration.

1101. **Variation de densité du gaz à la région du nœud. Existence des ventres de vibration** — L'existence des nœuds fixes étant bien reconnue, nous devons nous demander quel est l'état de la masse gazeuse dans la région qui correspond à ces surfaces nodales. On a reconnu que la lame d'air, qui forme le nœud, possède une densité différente de celle de l'air ambiant, et ce fait peut être aisément démontré par l'expérience. Prenons en effet un tuyau ouvert (*fig.* 498); en lui faisant rendre le son le plus grave, qu'on nomme *son fondamental*, nous savons qu'il existe, dans ce cas, un nœud au milieu de la longueur. Eh bien, si nous pratiquons à ce point milieu une ouverture O dans la paroi, le son change aussitôt de hauteur. L'ouverture en question mettant la lame gazeuse médiane en communication avec l'air extérieur, n'a pu avoir d'autre résultat que d'obliger celle-ci à conserver une densité constante, celle de l'atmosphère. Si donc le son produit a été altéré au moment où l'on a ouvert l'orifice, c'est qu'avant cette opération, la tranche nodale prenait une densité ou une pression différente de celle de l'atmosphère.

On démontre aussi, par l'expérience, qu'un ventre existe au milieu de l'intervalle qui sépare deux nœuds consécutifs, et il est caractérisé par le mouvement rapide de la lame d'air qui lui correspond et l'invariabilité de densité qui y demeure identique à celle de l'atmosphère. Dans ce but, rendons plus rapide le courant d'air qui fait sonner le tuyau ouvert, afin de lui faire donner l'octave du son qu'il faisait entendre d'abord. Nous constaterons, en employant les méthodes déjà indiquées, qu'il existe

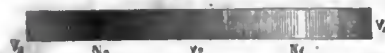
deux nœuds, l'un au premier quart en N_1 (*fig.* 498), l'autre au dernier quart inférieur en N_2. Dès lors, il s'agit de prouver qu'il existe un ventre au milieu même du tuyau, aux points où se trouvait tout à l'heure la surface nodale. Dans ce but, faisons pénétrer un piston jusqu'en V_2, le son est changé ; donc la lame d'air en V_2 n'était pas immobile avant l'introduction du piston ; plaçons-y la membrane saupoudrée de sable, celui-ci sautille plus rapidement que dans les points voisins. Enfin, ouvrons l'orifice O qui nous a déjà servi et qui est placé en V_2, le son n'est en rien modifié. Donc en V_2 la lame d'air possédait déjà la même densité que l'air ; elle offre, en définitive, tous les caractères que nous avons assignés aux ventres de vibration.



Fig. 498.

1102. Comment peut-on concevoir qu'il en soit ainsi ? Si nous nous nous reportons aux développements qui ont été donnés à propos de la propagation du son dans les milieux élastiques (1055 et suivants), nous verrons que l'immobilité d'une tranche gazeuse N_1 (*fig.* 499) dans un milieu qui vibre s'explique aisément, en admettant qu'il existe, de part et d'autre de cette tranche, des molécules animées, à chaque instant, de vitesses de signes contraires, les unes dirigées de V_1 en N_1, les autres de V_2 vers le même nœud N_1 ; et comme, par une raison de continuité, la vitesse de ces molécules ne peut, de positive qu'elle est d'un côté de la tranche, devenir négative de l'autre, sans passer par zéro ; on voit que la tranche comprise entre les deux régions, où les excursions des molécules sont de sens inverse, devra demeurer elle-même immobile.


Fig. 499.


Fig. 500.

L'explication que nous venons de donner nous conduit à une conséquence importante qui vient d'être justifiée par l'expérience. La lame d'air qui forme le nœud se trouvant comprise entre deux portions de gaz, dont les mouvements sont en sens inverse, doit posséder une densité différente de celle de l'air ambiant, densité qui sera supérieure quand les deux mouvements inverses qui s'exécutent de part et d'autre du nœud, tendront tous les deux à diminuer le volume de la tranche immobile, et qui sera, au contraire, plus petite lorsque les deux mouvements inverses tendront à augmenter le même volume. L'on voit, de plus, que par les changements de signes successifs des vitesses dans toute la longueur d'une colonne gazeuse qui vibre, deux nœuds consécutifs seront toujours à un même moment dans des conditions telles, que si pour l'un d'eux N_1 la densité est plus grande que celle de l'air extérieur, pour l'autre N_2 la densité

est plus petite. Or, toujours par une raison de continuité, on ne peut passer d'une tranche N_1 plus dense que l'air, à une autre N_2 qui soit moins dense que lui, sans rencontrer une couche intermédiaire V_2 qui ait la même densité : il devra donc y avoir dans l'intervalle de deux nœuds consécutifs une lame gazeuse animée d'une vitesse maximum et dont la densité sera toujours la même que celle de l'atmosphère ambiante. Cette lame forme ce qu'on a appelé le *ventre* de vibration.



Fig. 501.



Fig. 501 *bis*.

Les figures 499 et 500 montrent, par une succession de teintes, cet état alternatif de dilatations et de condensations qui se produisent aux nœuds consécutifs, dans le cas des tuyaux ouverts; les figures 501 et 501 *bis* montrent ces mêmes changements de densité dans le cas des tuyaux fermés.

La connaissance des faits que nous venons d'établir dans les précédents paragraphes, simplifie beaucoup l'étude des tuyaux sonores. Nous nous occuperons successivement des tuyaux ouverts et des tuyaux fermés.

1103. **Tuyaux ouverts. — Hauteur du son fondamental.** — Quand on fait rendre à un tuyau ouvert le son le plus grave qu'il puisse donner, on reconnaît que le son rendu est toujours tel que la longueur d'ondulation simple, qui lui correspond, est à peu près égale à celle du tuyau, depuis la bouche jusqu'à l'ouverture supérieure. Ainsi la longueur du tuyau est-elle de 1 mètre, on trouve que le nombre des vibrations, qu'il exécute par seconde est de 340 ; et la formule du paragraphe 1056, $\lambda = \frac{v}{n}$, nous donne pour la longueur de l'ondulation $\lambda = \frac{340^m}{340} = 1$ mètre, c'est-à-dire la longueur même du tuyau. Or, dans ces conditions, l'expérience (1100) nous montre qu'il existe dans la colonne vibrante un seul nœud, placé vers le milieu du tuyau, tandis qu'aux deux extrémités se trouvent évidemment des ventres de vibration : nous en concluons que la distance de deux ventres représente la longueur d'ondulation simple du son produit.

1104. **Loi des longueurs.** — Du résultat obtenu dans le paragraphe précédent il résulte que les sons fondamentaux rendus par deux tuyaux de longueurs différentes correspondront à des nombres de vibrations qui seront en raison inverse des longueurs de ces tuyaux. Cette loi se prouve expérimentalement par l'emploi des deux tuyaux T et T' (*fig.* 502) de longueur 1 et $\frac{1}{2}$. Le son fondamental du tuyau le plus court est à l'octave aiguë du son que fait entendre le tuyau le plus long.

1105. **Harmoniques des tuyaux ouverts.** — Quand on force progressivement le courant d'air qui pénètre dans un même tuyau ouvert, on lui fait rendre successivement les sons qui correspondent à la série des nombres entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc. Ainsi, quand le son fondamental est ut_1, celui qui lui succède immédiatement est ut_2, l'octave aiguë du son fondamental, et correspond à un nombre double de vibrations. Viennent ensuite sol_2 correspondant à un nombre triple de vibrations, ut_3 à un nombre quadruple, mi_3 à un nombre quintuple, etc.



Fig. 502.

1106. Si l'on étudie en même temps la distribution des nœuds et des ventres pour chaque son individuel, on reconnaît d'abord que les nœuds fixes sont équidistants, puis on trouve ensuite pour ut_1, comme nous le savons déjà, un nœud au milieu en N_1, un ventre à chaque extrémité de la colonne gazeuse (*fig.* 503); pour ut_2 (*fig.* 504), un ventre V_1 à l'entrée; un nœud N_1 au premier quart, un ventre V_2 au milieu, un nœud N_2 au troisième quart, et enfin un ventre V_3 à la bouche du tuyau, de telle sorte que cette fois le tuyau se partage en deux tuyaux V_1V_2 et V_2V_3 ayant leur nœud en N_1 et en N_2 et chacun moitié du tuyau total, on s'explique aisément pourquoi le son obtenu est à l'octave du son fondamental. Les figures 505 et 506 montrent le mode de partage de la colonne vibrante, dans le cas des sons 3 et 4; pour le son 3, la distance de deux ventres consécutifs est $\frac{1}{3}$ de la longueur du tuyau; pour le son 4, elle est $\frac{1}{4}$. Les sons produits doivent donc correspondre à des nombres de vibrations trois fois, quatre fois plus grande.



Fig. 503.

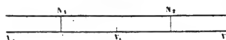


Fig. 504.

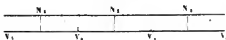


Fig. 505.

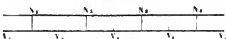


Fig. 506.

1107. La flûte de palissandre figurée ci-contre (*fig.* 507) permet de donner une démonstration directe de ce partage spontané de la colonne

d'air en parties d'égale longueur vibrant à l'unisson. Elle est composée de plusieurs tubes égaux vissés les uns au bout des autres. S'il y a trois tubes, et qu'on fasse rendre à la flûte le son 3, on peut enlever le tube supérieur en le dévissant : la hauteur du son n'est pas modifiée pour cela ; on peut enlever de même le second tronçon sans qu'il en résulte aucun changement appréciable dans l'acuïté. Donc la masse gazeuse était elle-même, avant qu'on n'en diminuât la longueur, divisée en trois parties de même longueur qui vibraient séparément, comme elles l'eussent fait dans un tuyau de longueur $\frac{1}{3}$ rendant le son fondamental.


Fig. 507.

1108. **Tuyaux fermés.** — Le son fondamental que fait entendre un tuyau fermé est celui que donnerait un tuyau ouvert de longueur double.

Le tuyau qui a été dessiné ici (*fig.* 508) sert dans les cours pour démontrer cette loi; il est traversé, au milieu de sa longueur, par une lame de bois pouvant glisser dans une coulisse, et portant une ouverture O, dont la section est à peu près égale à celle du tuyau. Quand la lame est poussée de telle sorte que le tuyau ait sa colonne d'air continue, il donne le son fondamental ordinaire d'un tuyau ouvert aux deux bouts dont la longueur est la distance de l'extrémité T' à la bouche inférieure T. Si l'on tire la lame de manière que l'ouverture O se trouve portée en dehors du tuyau, et qu'au contraire la partie pleine de la lame coupe la colonne gazeuse en deux tronçons, on reconnaît que dans ces conditions nouvelles, le son fondamental rendu par le tuyau n'est pas changé. Ce résultat confirme le principe que nous avons énoncé : le tuyau fermé TO donne le même son fondamental que le tuyau ouvert TT' de longueur double.

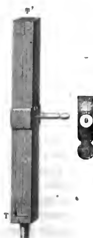


Fig 508.

1109. Dans un tuyau fermé il existe évidemment un nœud à l'extrémité fermée, un ventre à l'extrémité ouverte. Si le tuyau rend le son fondamental, il n'existe pas d'autre nœud ni d'autre ventre.

1110. **Loi des longueurs.** — Quand on comparera plusieurs tuyaux fermés de longueurs différentes, la loi déjà énoncée pour les tuyaux ouverts

subsistera encore ici. Les nombres de vibrations des sons fondamentaux seront en raison inverse des longueurs des tuyaux : c'est une conséquence immédiate du résultat démontré au § 1108.



Fig. 509.



Fig. 510.

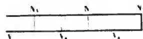


Fig. 511.

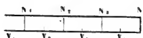


Fig. 512.

1111. **Sons rendus par les tuyaux fermés.** — Quand on force le courant d'air, on obtient successivement les sons 1, 3, 5, 7, etc., si bien qu'un tuyau dont le son fondamental est ut_1, fait entendre, en augmentant l'énergie de l'insufflation, les sons sol_2, mi_3, etc. Si, au moment de la production de ces divers sons, on étudie par les méthodes ordinaires (1100) le mode de partage de la colonne vibrante, on trouve, pour les sons 3, 5, 7, la division indiquée par les figures 510, 511, 512, et l'on voit de suite que l'intervalle de deux ventres ou de deux nœuds qui donne toujours la longueur d'onde du son produit est dans le tuyau qui rend le son 3 le tiers de ce qu'elle est dans le même tuyau fermé quand il rend le son 1 ; elle en devient le $\frac{1}{5}$, le $\frac{1}{7}$, quand ce tuyau fait entendre les sons 5 et 7.

1112. **Restriction à introduire dans les résultats précédents.** — Nous avons admis dans ce qui précède, que lorsqu'un tuyau sonore fait entendre l'un quelconque de ses harmoniques, la distance du ventre V_1, qui correspond à l'entrée du tuyau, au nœud N_1, qui le suit immédiatement, est égale à l'intervalle qui sépare un nœud d'un ventre dans une portion quelconque du tuyau. Ainsi, dans le tuyau ouvert qui rend le son 2 (*fig.* 498), on devrait avoir d'après cela, $V_1 N_1 = N_1 V_2 = V_2 N_2 = N_2 V_3$. Ceci n'est pas complétement vérifié par l'expérience ; on trouve toujours que le premier nœud inférieur N_1 est un peu plus rapproché de l'embouchure V_1 que du ventre V_2 qui est immédiatement placé au-dessus. Il en est de même de l'intervalle $N_2 V_3$ qui correspond à l'autre extrémité du tuyau ouvert; il est plus petit que $N_1 V_2$ ou que $V_2 N_2$. Un résultat analogue se manifeste dans les tuyaux fermés.

1113. La longueur du tuyau ouvert ou le double de la longueur du tuyau fermé ne représentent jamais rigoureusement la longueur d'ondulation simple du son fondamental produit ; celle-ci, qui s'obtient immédiatement par la relation $\lambda = \frac{v}{n}$ (1104) est toujours un peu plus grande que celle que fournit la mesure directe de la longueur du tuyau.

Il résulte d'expériences faites par Dulong, Masson, et par MM. Lissa-

jous et P. Desains, qu'on a une mesure exacte de la longueur d'onde du son produit, en évaluant par une expérience directe la distance de deux nœuds consécutifs dans l'intérieur même de ce tuyau.

1114. **Aperçu de la théorie des tuyaux sonores.** — Nous avons, dans ce qui précède, envisagé la question des tuyaux sonores, à un point de vue exclusivement expérimental. Il est cependant une question à laquelle l'analyse mathématique peut seule répondre d'une manière complète, et que l'esprit du lecteur a dû se poser. Quelle est la raison de ces nœuds fixes et de ces ventres fixes, dont nous avons prouvé l'existence dans la colonne gazeuse, qui vibre dans les tuyaux? Un mot seulement sur ce point.

1115. L'air contenu dans les tuyaux est parcouru simultanément par des ondes directes allant de la bouche vers l'extrémité opposée, et par des ondes inverses cheminant en sens contraire et ne gênant nullement le mouvement des premières. Ces ondes inverses proviennent de la réflexion des ondes directes, soit sur le fond solide du tuyau fermé, soit sur la tranche de l'air extérieur qui affleure à l'extrémité du tuyau ouvert. La superposition des deux systèmes d'ondes détermine, en chaque point de la colonne gazeuse, une vitesse résultante qui dépend de la grandeur et du signe des vitesses apportées par chacune des deux ondes. On comprend donc qu'on puisse avoir certaines tranches pour lesquelles les vitesses apportées soient constamment égales et de signe contraire : celles-là représenteront les nœuds fixes. Pour d'autres tranches au contraire, les vitesses s'ajouteront en donnant constamment une vitesse résultante maximum ; ces dernières constitueront les ventres fixes. En appliquant le calcul à ce mode complexe d'ébranlement, on arrive à prévoir la position des nœuds et des ventres, et les résultats de la théorie s'accordent bien avec ceux que donne l'expérience.

CHAPITRE V

VIBRATIONS DES VERGES ET DES PLAQUES

I. — VIBRATIONS DES VERGES.

En acoustique on donne le nom de *verges* à des tiges de bois, de métal ou de toute autre substance dont l'épaisseur est assez forte pour qu'elles restent droites et sans flexion notable quand on les tient horizontalement.

1116. **Vibrations longitudinales.** — Une verge serrée entre les doigts

ou entre les mâchoires d'un étau (*fig.* 513), exécute des vibrations longitudinales lorsque, à partir du point fixe, on la frotte dans le sens de la longueur avec un drap saupoudré de colophane ou imprégné d'eau acidulée : un son pur se fait alors entendre. Le procédé le plus simple pour montrer, dans ce cas, l'existence du mouvement vibratoire consiste à armer la verge d'une pointe faisant saillie latéralement, et à faire passer en contact avec cette pointe une plaque qui soit enduite de noir de fumée, et qui se déplace perpendiculairement à l'axe de la verge. La figure montre la disposition adoptée pour exécuter cette expérience; la verge et la pointe sont horizontales, la plaque enduite de noir de fumée monte verticalement, et la ligne sinueuse qui a été tracée par la pointe indique les vibrations.

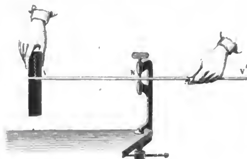


Fig. 513.

Les extrémités ont un mouvement oscillatoire, qu'on peut rendre manifeste en plaçant une petite bille d'ivoire suspendue à un fil à une très-petite distance de l'un des bouts de la verge. Aussitôt que le son se fait entendre, la bille est lancée avec force.

Les verges peuvent être libres à leurs deux bouts, ou libres à un bout seulement. L'étude du mouvement vibratoire des premières nous occupera tout d'abord.

1117. Verges libres aux deux bouts. — Les verges libres aux deux bouts peuvent être assimilées exactement à des tuyaux ouverts ; les lois de leurs vibrations sont les mêmes.

La verge étant fixée en son milieu seulement, on lui fait rendre facilement, par le moyen qui vient d'être indiqué, le son le plus grave qu'elle puisse donner ou le son fondamental. Par la méthode graphique, on constate alors que toutes les tranches sont en mouvement, à l'exception de celle du milieu, qui représente le nœud médian des tuyaux ouverts.

Par ces expériences, outre le phénomène des vibrations, on constate que l'allongement de la barre à certaines phases de son mouvement est, quoique toujours petit, énorme cependant, quand on songe à l'effort minime qui est nécessaire pour faire glisser le drap et produire le frottement. Si telle verge qu'on fait vibrer longitudinalement était fixée à l'une de ses extrémités et qu'on suspendît à l'autre des poids, il faudrait, dans certains

cas, plus de 1 000 kilogrammes pour produire dans sa longueur l'accroissement qu'elle acquiert à certaines phases de son mouvement.

1118. **Loi des longueurs.** — Comme dans les tuyaux ouverts, les nombres de vibrations correspondant au son fondamental varient en raison inverse des longueurs pour des verges de même nature et fixées en leur milieu. Prenez deux verges d'acier dont les longueurs soient dans le rapport de 2 à 1 ; la plus courte rend l'octave aiguë du son fondamental que l'autre fait entendre.

1119. **Sons harmoniques.** — Une verge dont on fixe la tranche située au quart de la longueur rend un son autre que le son fondamental, et qui en est juste l'octave. La verge se divise alors comme en deux verges vibrantes égales chacune à la moitié de la verge totale. En fixant successivement les points situés au sixième, au huitième, etc., etc., de la longueur de la verge, on obtient les sons 3, 4, 5, etc., c'est-à-dire les divers harmoniques, comme avec un tuyau ouvert. En un mot, les verges, quand elles sont ébranlées dans le sens longitudinal, se partagent, comme les cordes tendues, comme les colonnes d'air des tuyaux sonores, en segments qui vibrent à l'unisson.

1120. **Verges fixées à un bout.** — Une verge fixée à l'un de ses bouts est assimilable à un tuyau fermé.

1° Elle équivaut à une verge qui serait libre à ses deux bouts et de longueur double.

2° Quand on fait rendre le son fondamental à plusieurs verges, fixées par un bout, les nombres de vibrations qu'elles exécutent varient en raison inverse de leurs longueurs.

3° Une même verge peut faire entendre les harmoniques, dont les nombres de vibrations sont représentés par la série des nombres impairs 1, 3, 5, 7.

1121. **Vibrations transversales des verges.** — Les verges qu'on soumet à une flexion se redressent, en vertu de leur élasticité, et exécutent des vibrations, qui sont perpendiculaires à l'axe et qu'on appelle vibrations transversales. On étudie ces vibrations en se servant de verges aplaties sur lesquelles on projette du sable. La verge saisie entre les doigts et attaquée, à son extrémité, par l'archet rend un son musical, et du sable projeté à sa surface se rassemble et s'accumule sur des lignes qui indiquent les nœuds. Les lois de ces vibrations sont très-complexes; nous nous contenterons d'en énoncer une seule :

Des verges semblables qui sont ébranlées de manière que les nœuds et les ventres produits soient en même nombre et semblablement placés, exécutent des vibrations dont le nombre varie en raison inverse des dimensions homologues des verges.

1121 *bis*. **Diapason.** — Les diapasons sont des verges courbes qui vibrent transversalement. Quand on les ébranle à la manière ordinaire, soit en fai-

sant passer entre les deux branches un cylindre de bois dont le diamètre est un peu plus grand que la distance qui les sépare, soit en les attaquant avec un archet dans le voisinage des extrémités, ils donnent un son très-pur, le son fondamental. Mais quand l'archet frotte l'une des branches vers le milieu de sa longueur, c'est l'octave du son fondamental qui est nettement perçue.

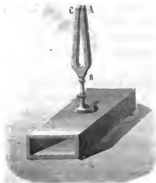


Fig. 514.

II. — VIBRATIONS DES PLAQUES.

1122. Déjà, il a été dit comment on excitait les vibrations des plaques, et comment l'on constatait le mouvement oscillatoire des molécules qui les exécutent. Mais un seul exemple de cette espèce de mouvement vibratoire a été donné; nous le mettons de nouveau sous les yeux du lecteur dans la figure 515.

En réalité, une même plaque peut rendre des sons très-différents et très-nombreux, et à chaque son particulier correspond un système de lignes nodales. Selon que l'on fixe tel ou tel point d'une plaque, une ligne nodale qui passe par ce point se dessine; une note nouvelle est rendue. Les figures 516, 517, 518 montrent trois systèmes de lignes relevées sur la plaque mise en expérience dans la figure 515; chaque fois le centre et deux ou trois autres points avaient été fixés.

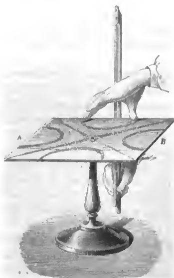


Fig. 515.

La figure 519 montre un des systèmes les plus simples des lignes nodales obtenues sur une plaque circulaire.

1123. **Loi des épaisseurs**. — Les nombres de vibrations exécutées par des plaques de même surface, varient comme les épaisseurs, lorsque les lignes nodales qui prennent naissance sont en même nombre et présentent la même disposition.

Deux plaques dont les épaisseurs sont dans le rapport de 1 à 2, rendent

des sons, dont les nombres de vibrations varient dans le même rapport. L'oreille reconnait que dans ce cas la plaque la plus épaisse rend l'octave aiguë.

1124. **Loi des surfaces.** — Les nombres des vibrations sont en raison inverse des surfaces lorsque l'épaisseur demeure constante.

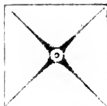


Fig. 516.

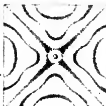


Fig. 517.



Fig. 518.

Deux plaques carrées de même épaisseur, mais dont les surfaces sont dans le rapport de 1 à 2, mises en vibration, résonnent à l'octave, si sur toutes deux les mêmes lignes nodales se dessinent.

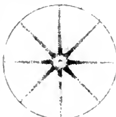


Fig. 519.

1125. **Loi des dimensions homologues.** —Enfin la loi des dimensions homologues est aussi celle des vibrations des plaques. Quand on prend deux plaques formées de la même substance et ayant des volumes semblables, les nombres de vibrations, qu'elles exécutent dans le même temps, sont en raison inverse de leurs dimensions homologues, à la condition toutefois que leurs lignes nodales marquent un même mode de division.

Cette loi, par laquelle nous terminons, est la plus générale de l'acoustique; nous avons eu occasion de la signaler pour toutes les espèces de corps vibrants.

CHAPITRE VI

DE L'OUÏE

1126. L'appareil auditif, au point de vue physiologique, se compose de deux parties bien distinctes: la première, douée d'une sensibilité spéciale,

est destinée à la *perception* et chargée de conduire l'impression sonore jusqu'au cerveau : elle est constituée par le Nerf acoustique ; la seconde est destinée à la *réception* et à la *transmission* des sons ; elle est représentée par l'Oreille proprement dite. Il est évident que l'étude de la partie sensible échappe au physicien, dont le but est de connaître la disposition des parties, afin de pouvoir fixer le rôle de l'*instrument* lui-même. Aussi, au point de vue physique, n'hésitons-nous pas à définir l'oreille : un appareil qui a pour effet de rassembler et de transmettre les sons. Ce double but est rempli par l'oreille externe, sorte de conque utile, mais non indispensable à la fonction, et par une série d'organes délicats qui commencent à la membrane du tympan, membrane vibrant à l'unisson des sons reçus, et qui aboutissent aux parties sensibles elles-mêmes, par l'intermédiaire de la chaîne des osselets.

C'est la description anatomique de ces divers organes chez l'homme, que nous allons rapidement exposer. Nous insisterons ensuite sur les usages respectifs et la valeur des différentes parties.

1127. **Anatomie de l'oreille.** — Chez l'homme, l'oreille est logée de chaque côté de la tête, dans les cavités mêmes des os, qui lui offrent à la fois un point d'appui, une protection et des circonvolutions nombreuses dans lesquelles s'épanouissent les dernières ramifications du nerf acoustique. Une division classique permet d'y considérer : 1° l'oreille externe, 2° l'oreille moyenne, 3° l'oreille interne.

1° L'*oreille externe* nous représente une cavité en forme d'entonnoir ; elle comprend non-seulement la partie tout extérieure ou Pavillon P (*fig.* 520) de l'oreille, mais encore le Conduit auditif externe C, c'est-à-dire le tuyau prolongé de cet entonnoir.

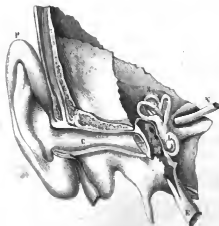


Fig. 520.

Les divers contours du Pavillon ont reçu des noms, qu'il importe peu d'indiquer dans l'étude succincte que nous voulons faire de l'appareil auditif ; tout ce qu'il faut retenir ici, c'est la direction en avant, de ces replis, la conservation de leurs formes par des cartilages, et leur mobilité restreinte ou absente chez l'homme, très-évidente au contraire chez certains animaux, notamment le cheval et le lièvre.

Le conduit auditif externe n'est pas rectiligne; il se porte flexueusement dans les cavités osseuses, se moule sur leurs parois et aboutit à la membrane du tympan qui le ferme à la partie la plus interne. Des poils nombreux et petits destinés à retenir les poussières de l'air, servent d'organe de protection à l'entrée de ce canal, et des glandes logées dans les téguments sécrètent une humeur qui lubrifie constamment ses parois.

2° *L'oreille moyenne* a été comparée par les anatomistes à un tambour véritable, d'où le nom de Caisse du tympan donné à sa cavité. Nous y trouvons en effet une membrane tendue sur un cadre osseux et capable d'entrer en vibration : c'est la Membrane du tympan T dont le plan fait un angle assez aigu avec la direction du conduit auditif. Cette membrane est circulaire, très-mince, en rapport par sa face interne avec la chaine des osselets.

La paroi de la caisse opposée à la membrane du tympan, présente deux ouvertures, la Fenêtre ronde F et la Fenêtre ovale F', ouvertures qui sont fermées, la dernière par la base de l'un des osselets : l'Étrier; la première par une membrane propre.

En même temps que la Caisse du tympan, nous devons décrire une partie intéressante pour nous : la Trompe d'Eustache E formée par un canal allant de la cavité de l'oreille moyenne à l'arrière-fond des fosses nasales, pour mettre cette cavité en libre communication avec l'air extérieur auquel elle livre passage, comme cela a lieu dans les caisses militaires, par l'intermédiaire d'un orifice étroit placé latéralement.

Enfin, la Caisse du tympan contient dans son intérieur une série d'osselets formant une chaîne continue depuis la membrane du tympan jusqu'à la fenêtre ovale. Ces petits os sont au nombre de quatre et désignés. d'après leur forme, sous les noms de Marteau *m*, Enclume *g*, Os lenticulaire *l*, Étrier *e*. Ils sont réunis par des ligaments aux parties voisines; le marteau notamment est en relation directe avec la membrane du tympan. De plus, divers muscles M,M', qui président à leur mouvement paraissent destinés à agir médiatement, par l'intermédiaire des osselets, sur les membranes du tympan, peut-être aussi sur d'autres parties dont ils augmentent ou diminuent l'état de tension.



Fig. 521.

3° *L'oreille interne* est la partie la plus délicate et partant la plus protégée de l'appareil auditif, elle est logée dans la portion la plus dure de l'os temporal, celle qu'on appelle le Rocher; elle présente des circonvolutions nombreuses qui lui ont valu le nom de Labyrinthe.

Nous ne pouvons décrire ici tous ces conduits; nous dirons seulement que l'oreille interne se compose d'une cavité irrégulièrement ovoïde appelée Vestibule, à laquelle viennent aboutir trois tubes curvilignes, 1° les

Canaux semi-circulaires S; 2° une ampoule de forme conique L, désignée sous le nom de Limaçon, pour rappeler sa ressemblance avec les coquilles de certains mollusques gastéropodes; 3° le Conduit auditif interne.

Le Conduit auditif interne est un canal qui livre passage au Nerf acoustique N; ce nerf vient exercer sa fonction dans l'oreille interne qui acquiert par cela même une grande importance, et constitue, à proprement parler, la seule partie essentielle et fondamentale du sens de l'ouïe; c'est la seule qui existe chez certains animaux. A côté de lui viennent par ordre d'importance les Canaux semi-circulaires et le Limaçon.

Ces diverses parties sont tapissées de lames minces, molles, membraneuses, transparentes, multipliant encore les surfaces déjà si nombreuses de l'oreille interne, et offrant un développement considérable sur lequel viennent s'épanouir les branches terminales du Nerf acoustique. Des liquides spéciaux baignent constamment l'oreille interne de manière à maintenir sur ses parois l'humidité nécessaire à la fonction nerveuse. Enfin, des concrétions calcaires, blanchâtres, soit pulvérulentes, soit concrètes, suivant les animaux sur lesquels on les observe, sont répandues dans le labyrinthe ou nagent dans les liquides qui le remplissent, de manière à continuer, peut-être jusqu'à l'organe sensitif, le rôle des osselets de l'oreille moyenne.

1128. **Usages des diverses parties de l'oreille.** — Maintenant que nous connaissons la disposition anatomique des organes compliqués qui servent d'instrument au sens de l'ouïe, nous pouvons essayer d'en apprécier le rôle et le mécanisme.

Les usages de l'oreille externe sont évidents, et les courbures de ses diverses inégalités paraissent destinées à réaliser cette condition : que la conque ait toujours une partie de sa surface interne placée sur le trajet des ondes sonores, afin que ces dernières puissent être réfléchies dans une direction convenable jusque sur la membrane du tympan. Il paraît, en effet, que chez l'homme, une inclinaison ou plutôt un écartement du pavillon coïncide avec une grande finesse de l'ouïe. Quoi qu'il en soit de cette observation, chacun sait que les animaux craintifs ou nocturnes ont ces parties extrêmement développées ou très-mobiles. Chez certaines chauves-souris les dimensions du pavillon sont énormes, et nous voyons tous les jours des animaux qui ont la faculté de diriger l'ouverture de l'oreille externe vers le côté d'où vient le bruit.

Les flexuosités et la courbure vers le haut du conduit auditif externe ne paraissent avoir d'autre but que de s'opposer à l'introduction des corps étrangers. D'après Muller, ce conduit serait destiné à renforcer les sons; il faut remarquer en effet que la disposition infundibuliforme a pour résultat de concentrer sûrement les ondes sonores sur un espace de plus en plus petit. Ajoutons que l'oreille externe offre une sensibilité très-marquée et qu'elle représente ainsi une avant-garde contre les objets extérieurs.

le

1129. La membrane du tympan s'insère obliquement, nous l'avons vu; cette disposition a d'abord l'avantage d'éviter l'action brusque et directe des corps étrangers qui pénètrent dans l'oreille. En outre, grâce à cette obliquité, la partie terminale du conduit auditif interne, qui n'a guère que 7 ou 8 millimètres de diamètre, est fermée par une membrane qui mesure, à son point d'insertion, un diamètre de 10 ou 11 millimètres. La différence est sensible, on le voit, et les naturalistes ont établi que, toutes choses égales d'ailleurs, la perfection du sens de l'ouïe est en rapport direct avec la surface et avec l'obliquité de cette membrane.

1130. Si la membrane du tympan fermait une caisse vide ou pleine d'air complétement emprisonné entre ses parois, il est certain qu'elle ne vibrerait pas, ou qu'elle vibrerait mal. Aussi, faut-il bien se pénétrer de cette idée, que les deux faces de la membrane sont accessibles à l'air, et que les ondes sonores peuvent se transmettre aussi bien par l'oreille externe que par la trompe d'Eustache. Toutefois, les dimensions restreintes de ce dernier canal, sa position dans l'arrière-cavité des fosses nasales, et par conséquent son rapport avec de l'air, dont les vibrations se sont amorties sur des contours déjà nombreux, tout cela, disons-nous, n'en fait pas le conduit ordinaire des ondes sonores, mais seulement une ouverture destinée au maintien d'une pression toujours égale à la pression atmosphérique. L'expérience prouve d'ailleurs que si l'on bouche les oreilles avec le doigt on perçoit fort bien un son émis avec la bouche fermée; et, d'autre part, l'observation médicale a établi que l'occlusion de la trompe d'Eustache coïncidait avec une certaine dureté de l'ouïe.

L'oreille moyenne a pour usage, non pas seulement de transmettre les vibrations, mais elle est encore un appareil de perfectionnement dans lequel les sons sont atténués ou renforcés. Elle manque chez tous les invertébrés et même chez les vertébrés à respiration branchiale, et c'est elle qui donne aux animaux supérieurs la faculté d'apprécier la valeur exacte des sons. Ce rôle important est rempli par les divers organes, qui constituent la caisse du tympan, membranes et osselets; il est rempli encore par des prolongements considérables, variables d'étendue et de forme, qui, sous le nom de Cellules mastoïdiennes, s'étendent dans l'épaisseur de l'os temporal. Chez l'homme cet agrandissement de cavité a déjà son importance; chez les oiseaux, les ruminants, etc., elles se prolongent jusque dans l'os occipital, et offrent un développement très-notable.

1131. La chaîne des osselets présente des flexuosités, et fait l'effet d'un ressort destiné à transmettre, avec tous les ménagements désirables, les vibrations sonores. Les muscles, qui les font mouvoir, ont pour action secondaire, nous l'avons dit, de tendre ou de relâcher la membrane du tympan et de la rendre aussi parfaitement apte à vibrer à l'unisson de tous les sons qui viennent de l'extérieur. Ces muscles sont soumis jusqu'à un certain point

à l'empire de la volonté ; quelques personnes ont la faculté de les faire mouvoir, et de produire ainsi un léger bruit dans leur oreille, mais chez tous ils sont soumis à l'action reflexe, c'est-à-dire qu'ils agissent instantanément pour répondre aux provocations extérieures sans l'intermédiaire de la volonté. L'utilité de ces muscles est très-grande ; à part la finesse du sens auditif qu'ils favorisent au plus haut point, ils relâchent la membrane dans le cas des impressions trop vives et évitent ainsi sa rupture. On a vu en effet des coups de canon tirés à l'improviste et avant que la membrane eût acquis le relâchement nécessaire déterminer la déchirure de cet organe.

Du reste, ces divers organes sont utiles, mais non indispensables, la perte ou la déchirure du tympan, l'absence des osselets n'entrainent pas la surdité complète.

1132. Nous avions donc raison de dire en commençant que l'organe seul essentiel est l'oreille interne et même le vestibule. Chez les crustacés et les céphalopodes, le vestibule forme seul le sens de l'ouïe. Les autres parties du labyrinthe lui-même n'apparaissent que successivement dans les êtres plus élevés de l'échelle animale pour n'être complètes que chez les mammifères.

LIVRE SIXIÈME

OPTIQUE.

CHAPITRE PREMIER

PRÉLIMINAIRES.

1133. L'optique est la partie de la physique qui comprend l'étude des phénomènes produits par l'action de la lumière.

D'habitude ces phénomènes se présentent en très-grand nombre à nos regards, et par leur multitude ils produisent une confusion que l'analyse ne démêlerait qu'avec d'immenses difficultés. Aussi le physicien prend-il avant tout des précautions particulières pour éviter les influences perturbatrices; il se place dans la chambre noire, c'est-à-dire dans un espace fermé de toute part, où ne pénètre aucune autre lumière que celle dont il se propose de faire l'étude. Là, il peut observer successivement chaque phénomène, et n'ayant plus ni la vue ni l'esprit troublés par des effets étrangers, il lui est plus facile de poursuivre dans tous ses détails l'analyse qu'il s'était proposé de rendre complète.

1134. **Corps lumineux.** — Lorsqu'on vient à introduire dans la chambre obscure, où nous sommes placés, un corps lumineux, une lampe allumée, par exemple, le premier effet qui nous frappe, c'est que nous n'apercevons pas seulement la source de lumière, mais nous distinguons tous les objets placés dans le voisinage : quelques-uns même, tels que les métaux polis, brillent d'un grand éclat.

Cette première expérience conduit à une conclusion, qui, quoique bien connue, devait être cependant rappelée; c'est que des objets qui ne sont pas visibles par eux-mêmes deviennent lumineux quand ils sont mis en présence d'une source de lumière. Ces objets n'émettent pas de la lumière qui leur soit propre, mais ils peuvent renvoyer en partie celle qu'ils reçoivent des sources lumineuses. On est conduit, par suite, à distinguer les corps en deux groupes : 1° ceux qui sont lumineux par eux-mêmes, 2° ceux qui ne le deviennent que par la présence des premiers. Le soleil, les étoiles, les bougies allumées, le bois qui brûle appartiennent au

premier groupe, et presque tous les autres corps qui s'offrent à nos yeux rentrent dans le second.

Si un corps, non lumineux par lui-même, est en présence d'un foyer qui l'éclaire, il peut jouer le rôle d'une source de lumière, et rendre par sa seule influence les autres corps visibles. La lune nous offre un des meilleurs exemples que l'on puisse citer : elle n'a pas de lumière propre, car, aux époques où le soleil n'éclaire pas la face tournée vers la terre, nos yeux ne peuvent pas la distinguer dans le ciel ; mais quand la lumière solaire frappe le côté de la lune tourné vers nous, l'astre est rendu visible, et en outre, par sa seule influence l'obscurité de la nuit est dissipée.

1135. **Corps transparents, corps opaques.** — La distinction qui vient d'être établie entre les corps, n'est pas la seule qu'il importe de signaler ; certains corps, tels que le verre, laissent traverser en partie la lumière qui les frappe; les autres, tels que le bois, l'interceptent complétement : il y a donc lieu de distinguer les corps transparents et les corps opaques.

1136. **Propagation de la lumière.** — La lumière se propage en ligne droite. Pour le démontrer, on perce une ouverture au volet de la chambre noire, afin que la lumière du soleil puisse y pénétrer. Grâce aux poussières qui flottent dans l'air, et que la lumière solaire éclaire sur son passage, on voit nettement la route qu'elle suit. La ligne tracée est toujours une ligne droite. Cette ligne, suivant laquelle la lumière se propage, porte le nom de *rayon lumineux*.

De ce seul fait que la lumière se meut en ligne droite, on peut tirer l'explication d'un assez grand nombre de phénomènes ; nous citerons ceux qui présentent le plus d'intérêt.

1137. **Ombre.** — La lumière est interceptée par un corps opaque qui est placé à une certaine distance de la source lumineuse, et si cette dernière existait seule, une portion de l'espace resterait dans une obscurité complète dont il s'agit de déterminer les limites.

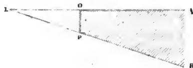


Fig. 522.

Pour y parvenir, nous réduirons d'abord la source lumineuse à des dimensions aussi petites qu'il est possible de l'imaginer : ce sera un point lumineux L. Je fais passer par le point L, un plan quelconque qui coupe l'écran opaque suivant OP, et j'examine d'abord ce qui a lieu dans ce plan. Les deux droites LA et LB qui partent de L et s'appuient sur la section en O et en P, partagent l'espace en deux parties : l'une située derrière le corps et comprise entre OA et PB et qui ne reçoit pas de lumière; car entre tout point de cet espace et le point lumineux L se trouve interposé le corps opaque : cet espace est dit dans l'*ombre;* l'autre partie, placée en dehors de l'espace AOBP, est évidemment éclairée.

Pour toute section faite dans le corps opaque, les mêmes constructions détermineraient l'ombre et la lumière. Donc, en général, pour tracer les limites de l'ombre, il faut décrire un cône en faisant tourner une ligne qui passe toujours par le point L et s'appuie constamment sur le corps opaque.

1138. **Pénombre.** — Deux points lumineux L et L' sont-ils placés devant un corps opaque? D'après les règles qui précèdent, on sait tracer l'ombre que donnerait chacun des points L ou L' s'il existait seul. La figure représente une section faite par un plan qui passe par L et L'. Les lignes LA, L'A', qui se rencontrent en O, les lignes LB, L'B' qui se rencontrent en P, sont tracées d'après les règles indiquées, et l'on peut voir que l'espace placé derrière le corps opaque, entre OA et PB', ne reçoit de lumière ni de L ni de L' : il est dans l'ombre complète. Quant aux espaces AOA', BPB', ils reçoivent de la lumière, mais de l'un des points L ou L' seulement; ils ne sont ni dans l'obscurité complète, ni en pleine lumière, on les dit dans la *pénombre*. Enfin, au delà de OA' ou de PB, se manifeste l'éclairement maximum.

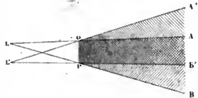


Fig. 523.

Entre L et L' supposons un point lumineux L'', la construction précédente pourra être faite. Par l'intervention de ce troisième point, la pénombre n'aura pas un éclat uniforme, la partie comprise dans l'angle A'OA'' sera éclairée plus fortement que celle que limitent les lignes OA et OA''. Ainsi la pénombre ira en se dégradant. Cette dégradation se fait ici très-brusquement; mais elle aura lieu par degrés insensibles, si entre les points L et L' on imagine un trait lumineux continu. Ce qui a été fait dans cette section particulière étant étendu à l'espace occupé par le corps, nous voyons que si l'on trace les deux cônes dont les sommets sont en L et en L' et qui s'appuient sur le pourtour de la surface opaque, la partie commune aux deux cônes donnera l'ombre complète, celle qui se trouve en dehors de cette dernière, et qui est limitée par les cônes extrêmes, correspondra à la pénombre : au delà, la clarté sera maximum.

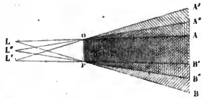


Fig. 524.

1139. **Application.** — Cette théorie s'applique aux ombres portées par les corps célestes. Pour tracer l'ombre et la pénombre produite par l'interposition de la lune placée devant le soleil, il suffira de reproduire la construction précédente. Si la terre entre dans l'ombre formée derrière la lune, un spectateur placé dans cette ombre ne verra pas le soleil : il verra l'é-

clipse totale : un spectateur placé dans la pénombre ne verra qu'une partie du soleil : pour lui l'éclipse sera partielle ; si un spectateur est placé sur le prolongement de la ligne qui joint le centre des deux astres à une distance telle qu'il soit dans la pénombre, il verra les bords du disque du soleil, et il les apercevra également de tous les côtés; pour lui l'éclipse sera annulaire.

La même explication se rapporte aussi aux éclipses lunaires : lorsque la lune entre dans le cône d'ombre produit par la terre, elle s'éclipse. Ici toutefois, une remarque importante doit être faite : l'atmosphère qui entoure notre globe agit, comme nous le verrons bientôt, en déviant les rayons lumineux et change les limites de l'ombre portée.

1140. **Expériences.** — Des faits nombreux, qui se présentent journellement à notre observation, nous montrent l'existence de l'ombre et de la pénombre. Lorsque la lumière d'une bougie se trouve interceptée par un corps opaque, on voit que l'ombre du corps sur les murs n'est jamais tranchée, qu'elle n'est point nettement limitée dans ses contours ; et cela est d'autant plus sensible que le corps opaque est plus éloigné du mur et plus rapproché de la source lumineuse. Si l'on regarde l'ombre des bâtiments un jour qu'il fait soleil, on distingue très-nettement la pénombre, surtout si l'on observe l'ombre portée par un point élevé de l'édifice. La pénombre est donc toujours sensible quand le corps lumineux a une certaine étendue. — Au contraire, quand on prend comme source la lumière électrique, qui se rapproche beaucoup par ses faibles dimensions d'un point lumineux, la pénombre disparait, et les ombres des corps sont nettement tranchées.

1141. **Chambre noire.** — La propagation de la lumière en ligne droite explique également un phénomène facile à constater, qui se montre dans la chambre noire. Ce phénomène se présente, lorsqu'au volet de la chambre on perce une petite ouverture, et que devant cette ouverture on place un écran. On voit alors se peindre sur celui-ci l'image des objets extérieurs ; cette image, un peu vague dans ses contours, est renversée ; elle possède les couleurs naturelles à chaque point représenté. La figure 525 est destinée à donner une idée de cette belle expérience.

Voici l'explication du phénomène : soient *ab* une ligne de l'objet, O l'ouverture de la chambre noire. Considérons d'abord le point *a* qui est le plus élevé ; ce point envoie de la lumière en tous sens ; nous en sommes certains, car l'œil, en quelque position qu'il soit placé, voit le point *a*. Parmi les rayons lumineux que *a* envoie, il en est qui viendront vers l'ouverture, ils entreront dans la chambre en formant un cône qui aura pour sommet le point lumineux, et pour base l'ouverture elle-même. Ils viendront donc dessiner sur un écran placé perpendiculairement à l'axe du cône une image de l'orifice qu'ils ont traversé. Si ce dernier est très-petit et que l'écran soit très-

rapproché, la trace lumineuse obtenue sera sensiblement un point a', et pourra être considérée comme l'image du point a. Le point b fera de même



Fig. 525.

son image en b', et ainsi pour tous les points intermédiaires ; l'ensemble donnera l'image $a'b'$. La construction indique très-nettement pourquoi l'image est renversée.

1142. L'ouverture O a été prise de petite dimension, et cela est tout à fait indispensable, car l'expérience prouve à tout le monde que si cette ouverture acquiert de grandes dimensions le phénomène ne s'observe plus. Une salle qui reçoit le jour par une large fenêtre ne donne pas le tableau des objets extérieurs sur le mur situé vis-à-vis. La raison en est que si l'ouverture O est large, les rayons qui partant du point a entrent dans la chambre, forment alors un large faisceau qui sur l'écran se marque non plus par une toute petite trace comparable à un point, mais par une large surface éclairée. Le point voisin de a produit le même phénomène, et ainsi des autres. Sur tous ces espaces éclairés par les points successifs, les lumières se superposent l'une à l'autre et forment un mélange, où aucune image ne peut être distinguée.

Dans tout ce qui a été dit, il n'a pas été question du tout de la forme de l'ouverture : elle peut être ronde, carrée, triangulaire, présenter des irrégularités quelconques, les mêmes raisonnements s'appliqueront dans ces circonstances diverses.

1143. Image du soleil. — Parmi les objets extérieurs qui se peignent dans la chambre noire, l'un d'eux peut être le soleil, et de là nous sommes amenés à reconnaitre que les rayons solaires traversant une ouverture de

forme quelconque, donnent une image ronde. Il faudra toutefois pour cela que l'écran soit perpendiculaire à l'axe du cône formé par les faisceaux incidents. Quand l'écran est incliné, des courbes elliptiques se dessinent.

Ce résultat rend compte des images à contours arrondis, que forme le soleil quand sa lumière passe à travers les intervalles que laissent entre elles les feuilles des arbres. Quelle que soit l'irrégularité des contours, les ombres portées sont limitées par des courbes elliptiques, à moins toutefois que les intervalles libres ne soient de grandes dimensions. Quand le soleil est en partie éclipsé et qu'on n'en voit plus qu'un croissant, ou bien quand la lune est dans son premier ou dans son dernier quartier, les images du croissant lumineux se dessinent sur le sol à travers les ouvertures du feuillage.

1144. Vitesse de la lumière. — C'est en 1675, que Roemer, astronome danois, appelé à l'observatoire de Paris par Louis XIV, mesura la vitesse avec laquelle la lumière se propage. Roemer y fut conduit par l'observation des éclipses des satellites de Jupiter (*).

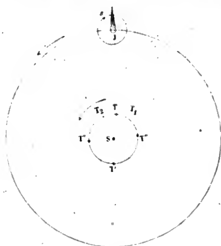


Fig. 526.

L'un des satellites de Jupiter le plus voisin de la planète, observé de la terre, placée en T_1 (*fig.* 526), disparaît aux yeux de l'observateur au moment de son immersion dans le cône d'ombre que Jupiter, éclairé par le soleil, projette derrière lui : le satellite, continuant sa course, sort du cône d'ombre, et un observateur peut, quand la terre est placée en T_2, noter l'instant précis de la sortie du cône d'ombre, ou ce que l'on appelle l'émersion. Avant Roemer, on savait que, entre deux émersions consécutives, il s'écoulait un temps égal à $42^h\ 28^m\ 35^s$. Cassini était arrivé à ce résultat en prenant la moyenne de toutes les bonnes observations qui avaient été

(*) Dans l'intérêt de la vérité historique, il est bon de remarquer que Cassini est le premier qui, pour rendre compte de certaines inégalités qu'il apercevait dans les mouvements des satellites de Jupiter, imagina d'attribuer à la lumière une vitesse finie ; seulement il abandonna un peu plus tard son hypothèse, et c'est alors que Roemer, s'emparant de l'idée de l'astronome français, la fit sienne en démontrant très-nettement la réalité et en donnant une valeur approchée de cette vitesse.

faites par les divers astronomes : dans cette moyenne. disparaissent les erreurs que les causes accidentelles introduisent. Roemer, en reprenant la question, reconnut que lorsque la terre est en T et qu'elle chemine dans une direction à peu près perpendiculaire à la ligne qui joint son centre à celui de Jupiter, l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux émersions successives du satellite est bien celui qu'avait indiqué Cassini. Il en est de même quand la terre est placée en T'; mais lorsqu'elle se trouve en T'' et qu'elle s'écarte très-rapidement de la planète en se déplaçant à peu près parallèlement à la ligne qui joint les deux centres, on trouve que le temps compris entre les deux émersions successives est plus grand que 42ʰ 28ᵐ 35ˢ. Enfin, le temps de deux immersions est plus petit que le précédent, lorsque la terre arrivée en T''' se rapproche rapidement de Jupiter.

Ces divers résultats s'expliquent très-bien en admettant que la lumière met un temps fini pour se propager d'un point à un autre. Le temps qui sépare deux émersions successives étant le même, l'observateur, qui est en T, alors que la distance entre la terre et le satellite change peu, voit les deux émersions se succéder après un intervalle de temps égal à celui qui les sépare, bien qu'en réalité il ne voie pas les phénomènes au moment de leur accomplissement. Au contraire, quand la terre est en T'', la première émersion parvient à l'observateur, quand la lumière a franchi tout l'espace qui le sépare du satellite ; mais quant à l'émersion suivante, elle est aperçue après un plus grand retard, car l'observateur s'est éloigné du satellite, il a fui la lumière qui doit lui annoncer l'instant de la sortie du cône d'ombre. Le faisceau lumineux a donc parcouru cette fois un espace plus grand que tout à l'heure. Par suite, le temps qui sépare les deux émersions est augmenté de tout le temps que la lumière aurait mis à franchir l'espace dont la terre s'est déplacée. Inversement quand la terre est en T''', qu'elle se rapproche de Jupiter, l'intervalle qui sépare deux immersions successives est diminué de tout le temps nécessaire pour que la lumière franchisse la distance que l'observateur a parcourue.

1145. Résultats obtenus. — Roemer, pour obtenir des résultats exacts, a observé une émersion lorsque la terre était voisine de T, puis une émersion lorsqu'elle était voisine de T', les retards se sont accumulés et ont donné une différence totale représentant le nombre de minutes que la lumière met à parcourir le diamètre de l'orbite terrestre. En calculant ces résultats, il a reconnu que la lumière parcourt ce diamètre en 16ᵐ 26ˢ : c'est une vitesse de 77 000 lieues par seconde, la lieue correspondant à 4 000 mètres. Un seul exemple suffira pour donner une idée de ce que doit être une vitesse aussi considérable. Un corps qui se mouvrait avec une vitesse de 15 lieues à l'heure, c'est-à-dire avec la rapidité d'une locomotive sur un chemin de fer, mettrait plus de deux siècles à parcourir une distance égale

à celle qui sépare le soleil de la terre. Eh bien! la lumière parcourt cet espace en moins de 9 minutes.

De ce que la lumière met un certain temps à franchir la distance qui sépare la source lumineuse du point qui est éclairé, il résulte que les phénomènes célestes ne sont visibles qu'au moment où ils ont déjà cessé d'être. Ceux qui se produisent à des distances peu éloignées de nous frappent nos yeux peu de temps après qu'ils se sont manifestés. Ceux qui ont lieu à la distance à laquelle se trouve le soleil parviennent à notre connaissance 8 minutes après qu'ils se sont accomplis. Quant aux étoiles, qui sont si éloignées de nous que la lumière émanée de la plus voisine met plus de 4 ans à nous parvenir, il est légitime d'admettre que la lumière de plusieurs d'entre elles met des siècles pour arriver jusqu'à la terre. Ainsi, au moment où l'une des périodes de leur histoire s'accomplit, nous assistons à une de celles qui se sont écoulées dans les siècles précédents.

1146. **Méthode de M. Fizeau.** — M. Fizeau est parvenu à déterminer la vitesse de la lumière par une méthode nouvelle qui repose, non plus sur l'observation des phénomènes astronomiques, dont les manifestations sont indépendantes de notre volonté, mais bien sur de véritables expériences, à l'aide desquelles le physicien provoque lui-même l'apparition des phénomènes qu'il veut étudier. à son gré, dans des conditions bien définies.

Dans ces expériences, M. Fizeau mesure le temps que la lumière met à franchir une distance d'environ 17 kilomètres, distance que la lumière parcourt en un temps plus petit que $\frac{1}{15000}$ de seconde; on comprend qu'une pareille détermination exige une disposition spéciale qui permette d'évaluer les intervalles de temps d'une extrême petitesse.

En principe, la méthode consiste essentiellement à lancer dans une direction AB (*fig.* 527), un rayon lumineux qui, après avoir parcouru quelques kilomètres, rencontre un miroir MN, revient dans la direction BA, de manière à frapper l'œil voisin du point A, si aucun corps opaque ne l'intercepte au moment où il retourne à son point de départ. Il suffira alors, pour résoudre le problème que nous nous sommes posé, de mesurer le temps employé par le rayon pour effectuer l'aller et le retour. Dans ce but, à un instant précis, on enlève un écran R qui empêchait la lumière de se propager dans la direction déterminée; alors, le rayon lumineux AB se dirige vers le miroir MN, et l'on cherche à quelle autre époque il faut qu'un autre écran soit placé, pour que le rayon de retour BA se trouve intercepté. L'intervalle de temps qui sépare deux interpositions consécutives donne le temps que la lumière a mis à parcourir le double de la distance comprise entre l'écran et le miroir.

D'après l'extrême rapidité de la marche du rayon lumineux, il est nécessaire que l'écran vienne arrêter le rayon de retour quelques cent-

millièmes de seconde, après que la lumière a été lancée. M. Fizeau réalise cette condition en se servant d'une roue divisée à sa circonférence, à la manière des roues dentées, en intervalles égaux, alternativement vides et pleins. Avec une roue qui fera un tour par seconde et qui aura 500 dents et 500 intervalles vides, une dent viendra se substituer au vide précédent au bout d'un temps égal à 0,001 de seconde. Si la roue va 10 ou 100 fois plus vite, c'est-à-dire si elle fait 10 tours ou 100 par seconde, toute dent remplacera le vide qui la précède au bout d'un 0,0001 ou 0,00001 de seconde. Une roue semblable, mue par un mouvement d'horlogerie, permettait donc à M. Fizeau de laisser passer un rayon lumineux dans l'espace vide compris entre deux dents, puis de l'arrêter après un temps très-petit, au moment de son retour, par l'interposition de la dent qui succède au creux.

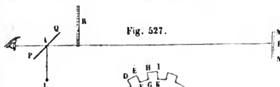


Fig. 527.

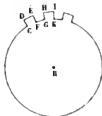


Fig. 528.

1147. **Expérience. — Appareil.** — La lumière d'une lampe L arrive sur une lame de verre PQ inclinée à 45°; elle est renvoyée vers le miroir MN, revient sur PQ en suivant toujours la ligne AB, et l'œil reçoit alors le rayon de retour qui traverse la lame de verre. Près de cette lame et suivant la ligne AB, se trouve la roue dentée R dont nous venons de parler. Celle-ci étant mise en mouvement, le rayon AB passe dès qu'un vide se présente ; et si la roue tourne avec une vitesse convenable, le rayon qui revient suivant BA trouve sur son passage la dent qui suit ; il est arrêté, il ne peut plus tomber sur le miroir PQ, et l'œil ne reçoit aucune lumière. Au contraire, pour une rotation plus lente de la roue, la lumière a le temps de revenir avant que la dent ne ferme le passage ; et de même, pour une rotation plus rapide, la dent qui suit l'espace libre a déjà fait place à un creux quand la lumière retourne à son point de départ : dans ce dernier cas, un nouvel intervalle libre a succédé au premier, et le rayon de retour pouvant passer, la clarté reparaît. Ainsi l'observateur reconnaît aisément le moment où la roue possède la vitesse convenable ; il a obtenu le résultat cherché, lorsque, par un accroissement progressif dans la vitesse de rotation, toute lumière vient à disparaître.

Pour nous rendre bien compte du phénomène, traçons plusieurs dents successives considérablement grossies (*fig.* 528) : CDEF est une première dent, GHIK la seconde. Le mouvement a lieu de K vers C ; commençons par supposer ce mouvement lent, et puis faisons-le de plus en plus rapide. En ce moment, CDEF empêche le rayon AB d'aller sur MN, mais bientôt le bord EF de la dent se présente ; le mouvement continuant, l'espace vide EFGH se trouve sur la direction AB et la lumière passe. Celle qui se propage tout d'abord en rasant EF trouve encore, à son retour, le passage libre ; mais la lumière qui s'échappe en rasant GH, rencontre en revenant la dent GHIK qui s'est interposée. A mesure que le mouvement s'accélère, ce n'est plus seulement la lumière qui rase GH, c'est aussi celle qui a traversé le milieu du vide qui est arrêtée par la dent GHIK ; ainsi, à mesure que la vitesse de rotation s'accroît, la lumière diminue peu à peu d'intensité, jusqu'à ce qu'enfin elle s'annule pour reparaître si le mouvement s'accélère suffisamment.

1148. **Résultats obtenus. Observations.** — Par cette méthode, M. Fizeau a trouvé les résultats qu'avait déjà donnés la méthode astronomique.

Toutefois, il faut ajouter que son appareil n'était pas aussi simple que celui que nous avons décrit : il fut obligé, pour réaliser son idée, d'ajouter quelques pièces optiques, car la lampe ne saurait donner un faisceau lumineux assez délié. Dans l'appareil de M. Fizeau, un système de lentilles concentre la lumière au point où les dents de la roue passent et la concentre en un tout petit espace. Les rayons lumineux, repris ensuite par une lentille nouvelle, cheminent suivant des lignes parallèles. Une dernière lentille les fait converger sur le miroir MN ; après quoi ils reviennent sur leurs pas, reprennent leur parallélisme primitif pour être concentrés de nouveau au point où ils l'avaient été au moment du départ et, à travers un dernier verre, l'œil aperçoit la lumière de retour sous la forme d'une petite étoile.

1149. **Intensité de la lumière.** — L'intensité de la lumière varie en raison inverse du carré de la distance : tel est l'énoncé habituel de la loi que nous allons expliquer. Cet énoncé veut dire que si un point lumineux ou un corps lumineux de petite dimension éclaire des surfaces identiques mais placées à différentes distances, l'éclairement de la surface sera quatre fois plus grand quand la distance sera deux fois plus petite, il sera neuf fois plus grand si la distance est trois fois plus petite. On démontre cette loi soit par le raisonnement, soit par expérience. Le raisonnement repose sur cette supposition très-probable que si l'on considère diverses sphères concentriques ayant pour centre commun le point lumineux, la quantité de lumière totale émise par ce point parviendra sans perte et par suite en quantité égale sur chacune des surfaces sphériques que nous venons d'imaginer. Considérons deux d'entre elles, dont l'une ait un rayon égal à 1 et l'autre un rayon égal à 2. Celle de rayon 2 a une surface quadruple

qui reçoit la même quantité totale de lumière que la surface appartenant à la sphère de rayon 1. Donc, chaque partie de la plus grande en reçoit quatre fois moins qu'une partie de même dimension prise sur la plus petite.

1149 *bis*. **Démonstration expérimentale.** — Par l'expérience la démonstration se fait au moyen d'une boite (*fig.* 529) dont une paroi verticale est percée d'une fenêtre recouverte de papier huilé. Une cloison opaque et verticale divise la fenêtre en deux moitiés et partage la boite en deux compartiments. Dans l'un d'eux on met une seule bougie A, et dans l'autre on en met quatre assez voisines B. On écarte ou l'on approche ces dernières jusqu'à ce qu'un observateur qui regarde d'une certaine distance le papier huilé en aperçoive les deux moitiés également éclairées. Si l'on mesure alors les distances des bougies à l'écran que le corps gras rend translucide, on trouve que la distance moyenne des quatre bougies à la paroi doit être deux fois la distance de la bougie unique. Ce résultat démontre la loi donnée, car dans le premier compartiment, si, au lieu de quatre bougies, on laissait une seule à la place qu'elles occupaient, elle produirait un éclairement quatre fois plus petit que celui donné par les quatre ensemble, ou bien encore un éclairement quatre fois moindre que celui qui provient de la bougie placée dans le second compartiment. Ainsi une lumière placée deux fois plus loin a une intensité quatre fois plus petite ; c'est la loi énoncée.

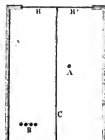


Fig. 529.

PHOTOMÉTRIE.

1150. **Importance de la photométrie.** — La photométrie est cette partie de l'optique qui s'occupe de la mesure du rapport des intensités lumineuses de deux sources différentes. L'importance d'un pareil sujet d'études se comprend aisément : plusieurs questions théoriques et quelques applications pratiques ne peuvent être abordées avec succès, qu'après la solution préalable du problème fondamental de la photométrie. Parmi les premières, nous citerons : la détermination des intensités lumineuses du soleil, des planètes, des étoiles et les questions qui s'y rattachent telles que le classement des étoiles d'après l'intensité de leur lumière, l'étude des changements de puissance de la lumière solaire aux différentes époques de l'année, aux différentes heures du jour. Parmi les secondes, se trouvent la comparaison des différents modes d'éclairage, la recherche de celui qui réalise le plus d'économie pour une même quantité de lumière fournie dans le même temps ; la détermination de la source

de lumière qu'il est préférable d'employer dans les phares, détermination qui a fait l'objet à plusieurs reprises des recherches des physiciens.

En un mot, le photomètre est pour l'optique ce que le thermomètre est pour la chaleur; cependant quelle différence dans les progrès accomplis pour la construction des deux instruments! Tandis qu'on sait, depuis longtemps déjà, apprécier les températures avec une grande rigueur, on ne peut estimer les intensités lumineuses qu'avec une grossière approximation, et le photomètre de précision est encore à trouver.

1151. **Principe sur lequel repose la construction des photomètres.** — La loi que nous avons donnée (1149) représente le point de départ théorique qui a guidé dans la construction des photomètres ordinaires. Pour l'intelligence de ce qui va suivre, il vaut mieux néanmoins la présenter sous une autre forme. La source B, qui est quatre fois plus intense quo A, doit, pour produire le même éclairement, être placée à une distance de la surface éclairée deux fois plus grande que cette dernière, ainsi que nous l'avons vu; de même, si les distances des deux sources à la surface qu'elles éclairent également sont dans le rapport de 3 à 1, leurs intensités seront dans le rapport de 9 à 1, et, en général, d et d' étant les distances des deux lumières à une même surface qu'elles éclairent également, le rapport des intensités lumineuses $\frac{I}{I'}$ des deux sources sera égal au rapport direct des carrés des distances $\frac{d^2}{d'^2}$ qui les séparent de la surface en question :

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Partant de ce principe, Huygens en 1653, Auzout en 1667, André Celsius en 1725, Bouguer en 1729, imaginèrent différents photomètres qui furent surtout employés dans les recherches astronomiques. Bouguer varia cependant les procédés de manière à les rendre aptes à être utilisés dans la pratique, et vers 1760, Lambert put se servir de l'un des instruments de Bouguer pour la comparaison de deux lumières quelconques.

1152. **Photomètre de Rumford.** — Parmi les méthodes photométriques qui ont été successivement adoptées, celle qui a obtenu le plus de succès et qui, jusque dans ces derniers temps, a été à peu près la seule utilisée dans les applications industrielles, est la méthode indiquée par Rumford. En voici le principe : un corps opaque T (une tige de verre noircie au noir de fumée, par exemple) (*fig.* 530), étant placé sur le trajet des rayons de lumière envoyés à la fois par deux sources différentes L, L', donne naissance à deux ombres distinctes O, O' qui se projettent sur un écran de carton blanc, placé à une petite distance du corps opaque. Chacune d'elles est éclairée par une lumière différente : O' par L' et O par L, et quand elles l'étaient également, Rumford était en droit d'admettre, qu'à l'identité d'as-

pect des deux ombres devait correspondre un éclairement égal de l'écran par chacune des deux lumières : dès lors le rapport des carrés des distances

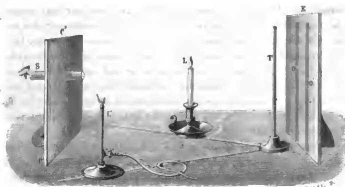


Fig. 530.

des lumières qui produisaient cette identité devait être égal au rapport de leurs intensités respectives.

Voici maintenant la description du photomètre de Rumford avec les perfectionnements que M. Péclet a apportés à sa construction. Sur une table de bois horizontale, sont creusées deux rainures rectilignes faisant entre elles un angle d'un petit nombre de degrés seulement ; un écran rectangulaire de carton E est posé verticalement sur la table, dans une direction perpendiculaire à la bissectrice de l'angle des rainures. La tige de verre noircie est placée en T, au sommet de cet angle, à une petite distance de l'écran et parallèle à sa surface : les deux lumières qu'on veut comparer sont posées sur des chariots qui peuvent glisser à frottement doux dans les rainures ; un repère porté par chaque chariot indique à chaque instant, par sa position sur le bord gradué de la rainure qui lui correspond, la distance de la lumière à l'*ombre qu'elle éclaire*. L'opérateur se place en S, derrière la cloison fixe C', et, à l'aide d'un tube qui protége sa vue contre le rayonnement direct des deux sources, il aperçoit simultanément les deux ombres qui se projettent en O et O'. A l'aide de cordons qui passent sur des poulies de renvoi, il fait alors varier lui-même, sans se déplacer, les distances des lumières à l'écran, jusqu'à ce que l'identité d'aspect des deux ombres se soit produite. Il n'a plus alors qu'à noter la position des repères sur la graduation qui accompagne chaque rainure pour en déduire, par un calcul fort simple, le rapport des intensités lumineuses.

1153. **Discussion du procédé de Rumford.** — Le procédé de Rumford est, comme on le voit, d'une grande simplicité, et c'est à cela qu'il faut attribuer la popularité qu'il a acquise : mais, quand on arrive à la mise en

œuvre, on reconnait bientôt que cette simplicité n'est qu'apparente, et que la détermination exacte du moment précis où les deux ombres sont égales constitue, en réalité, une opération fort délicate. Cette difficulté se fait surtout sentir, quand les lumières diffèrent un peu par leur coloration ; c'est là pourtant le cas ordinaire, alors qu'on veut comparer des sources lumineuses alimentées par des combustibles de nature différente. La meilleure preuve qu'on puisse donner de l'incertitude des résultats obtenus avec l'appareil de Rumford, c'est que, si on le met entre les mains de différents opérateurs ayant cependant l'habitude des expériences d'optique, si on les place tous dans les mêmes conditions et qu'on leur donne à comparer les mêmes lumières, ils arriveront le plus souvent à des résultats notablement différents.

1154. **Photomètre de Bunsen. Son principe.** — De tous les photomètres, celui qui s'adapte le mieux aux besoins de l'industrie, celui qui est le plus employé par les ingénieurs anglais pour évaluer le pouvoir éclairant du gaz de la houille, c'est le photomètre de Bunsen. Voici le fait d'observation qui a servi de point de départ dans sa construction : une feuille de papier blanc, bien homogène, portant une tache de matière grasse en son milieu, tache qui la rend translucide dans toute la portion imprégnée par le corps gras, est placée entre les deux lumières que l'on veut comparer, de manière que chacune de ses faces se trouve éclairée seulement par les faisceaux que rayonne une seule des sources, celle qui est en regard de la face considérée. Les rayons lumineux, dont l'ensemble constitue les faisceaux incidents, frappent, à peu près, tous à angle droit la lame de papier assez étroite qui sert d'écran ; dans ces conditions, il est facile de prévoir que si les deux foyers de lumière ont une même intensité, les deux faces de la tache huileuse devront présenter le même aspect ; mais l'expérience indique la production d'un phénomène beaucoup plus saillant : c'est la disparition complète de la tache centrale au moment où l'écran est également éclairé des deux côtés.

1155. **Photomètre de poche.** — L'un des appareils les plus simples où le principe précédent ait été utilisé porte le nom de *photomètre de poche ;* il est d'un emploi facile, et de plus il est très-portatif, comme son nom l'indique. Un ruban RR (*fig.* 531) tout à fait semblable à ces rubans enroulés sur des bobines que nous employons en France pour la mesure des longueurs, est tendu horizontalement entre deux points fixes : il touche, par l'une de ses extrémités, à la lumière L (bec de gaz, lampe Carcel, etc.) dont il s'agit d'évaluer l'intensité ; par l'autre, à la lumière type L', consistant habituellement en une bougie de blanc de baleine passée dans un anneau. L'écran E dont nous venons de donner la description peut glisser à la main sur le ruban tendu. L'opérateur, quand il veut exécuter une mesure, déplace lentement cet écran jusqu'à ce qu'il soit parvenu à pro-

duire la disparition totale de la tache de matière grasse. C'est donc en regardant alternativement des deux côtés de l'écran qu'il arrive prompte-

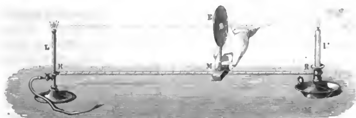


Fig. 531.

ment à produire l'égalité d'éclairement des deux faces de la lame de papier. Une lecture faite alors sur la graduation que porte le ruban le met à même d'évaluer numériquement le pouvoir éclairant de la source. Il lui suffit d'appliquer la loi qui a été établie plus haut. On prend habituellement, comme unité dans cette évaluation, l'intensité lumineuse de la flamme d'une bougie faite avec du blanc de baleine et fabriquée dans des conditions bien déterminées.

1156. **Défauts du photomètre précédent.** — Le photomètre de poche donne des indications promptes, mais on ne peut pas espérer qu'elles soient bien précises; l'instrument présente plusieurs imperfections :

1° Il n'a pas une stabilité suffisante à cause de la flexibilité du ruban.

2° On n'est jamais sûr que la flamme de la bougie, le foyer lumineux à évaluer et le centre de la tache soient alignés à la même hauteur au-dessus du ruban; les rayons émanés des deux sources peuvent donc avoir des inclinaisons différentes sur l'écran.

3° La bougie placée à l'air libre a une flamme vacillante variable d'intensité par le fait même de ses mouvements.

1157. **Photomètre de M. Burel.** — Aussi, le photomètre de Bunsen a-t-il successivement reçu de nombreux perfectionnements. Nous décrirons ici l'instrument imaginé par un ingénieur civil de Rouen, M. Burel, parce que les dispositions adoptées donnent à l'appareil une sensibilité à peu près constante dans les divers points de son échelle, et que, par suite, les mesures obtenues, à son aide, méritent une plus grande confiance.

Une barre prismatique de cuivre OO' (*fig.*532) solidement établie supporte les diverses pièces de l'appareil. A l'une des extrémités de la barre est maintenu par une vis de pression, en un point qui est le zéro de l'échelle photométrique, le support qui reçoit la source G dont on veut mesurer l'intensité : ce sera, par exemple, un bec de gaz. La lumière prise pour unité est une bougie de blanc de baleine B dont la flamme est

rendue immobile par une cheminée de verre analogue à celle des becs de gaz : elle est maintenue à une hauteur constante par un ressort à boudin, de telle sorte que le centre de la flamme du bec de gaz, le centre de l'écran et celui de la flamme de la bougie se trouvent constamment sur une même ligne droite. Le long de la règle de métal, se meuvent solidairement en demeurant à une distance invariable l'écran et la bougie, attachés sur un même pied. Deux miroirs plans inclinés à angle droit et dont l'angle dièdre est partagé en deux parties égales par le plan même de l'écran permettent à l'opérateur d'apercevoir simultanément sur une même surface plane placée devant lui, les images de la tache, et il peut alors reconnaître plus sûrement le moment précis où se produit l'identité d'aspect des deux faces. A l'avance, on a inserit sur la tringle de cuivre servant de support, des chiffres qui donnent immédiatement sans calcul le rapport du pouvoir éclairant des deux lumières qu'on compare; une fenêtre pratiquée dans la pièce à coulisse qui porte la lumière type découvre les divisions de l'échelle tracée sur la tringle et un index correspondant à l'axe vertical de la flamme de la bougie, indique à l'opérateur, par sa position sur cette échelle, à combien d'unités correspond l'intensité de la source examinée.

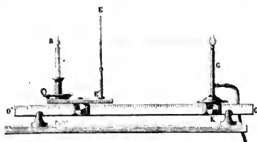


Fig. 532.

1158. **Sensibilité du photomètre précédent.** — Pour apprécier le degré de sensibilité de cet instrument, il suffit de remarquer que le système mobile formé par la bougie et l'écran se déplace toujours de quantités égales, quand les intensités lumineuses varient comme les carrés des nombres consécutifs 1, 2, 3, etc.

En effet, dans le cas où les deux lumières ont même intensité, l'écran se trouve placé à une distance du bec de gaz égale à la distance fixe l qui le sépare de la bougie : inscrivons le chiffre 1 en regard de la position actuelle de l'index. Si nous appelons maintenant x la quantité dont se déplace, à partir de ce point de départ, le système mobile, quand l'intensité de la flamme du bec de gaz devenant I, on fait mouvoir le chariot pour que les deux faces de l'écran soient également éclairées; on aura d'après la loi connue :

$$\frac{\mathrm{I}}{1} = \frac{(x+l)^2}{l^2}, \quad \text{d'où} \quad x = l\left(\sqrt{\mathrm{I}} - 1\right).$$

Donc en faisant successivement :

$$I = 1 \;\ldots\ldots\; 4 \;\ldots\ldots\; 9 \;\ldots\ldots\; 16 \;\ldots\ldots\; 25 \;\ldots\;\ldots\; \text{etc.},$$

on trouve comme valeurs correspondantes de x :

$$x = 0 \;\ldots\; l \;\ldots\;\ldots\; 2l \;\ldots\ldots\; 3l \;\ldots\;\ldots\; 4l \;\ldots\ldots\; \text{etc.},$$

ce qui revient à dire que pour des différences dans les intensités lumineuses du bec de gaz et de la bougie égales aux différences des carrés des nombres consécutifs, le déplacement du système est constant, égal à l et par conséquent toujours très-notable. A la rigueur, la sensibilité décroît, mais d'une manière peu rapide.

CHAPITRE II

RÉFLEXION

1159. **Lois de la réflexion.** — La lumière qui tombe sur une surface polie, se réfléchit : notre expérience de chaque jour nous l'enseigne. Lorsque les rayons solaires frappent un miroir, tout le monde sait que ce miroir renvoie les faisceaux lumineux dans une direction déterminée, qui dépend de l'angle que fait la surface polie avec les rayons incidents. La réflexion s'opère suivant deux lois qui ont été déjà données dans l'étude de la chaleur rayonnante; les voici :

1° Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

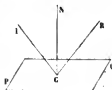


Fig. 533.

Soit PQ une surface plane réfléchissante (*fig.* 533); IC un rayon lumineux qui tombe sur cette surface; CR le rayon réfléchi; CN la perpendiculaire au plan élevée au point d'incidence C. D'après la première loi, IC, CR et la normale CN à la surface réfléchissante sont trois lignes contenues dans un même plan; d'après la seconde loi, l'angle de réflexion NCR est égal à l'angle d'incidence ICN.

Si la surface, au lieu d'être plane comme l'est PQ, est une surface courbe telle que celle d'une sphère, par exemple, les mêmes lois subsistent. Le

rayon IC (*fig.* 534), arrivé au point C, rencontre un petit élément superficiel qui peut être considéré comme se confondant avec le plan tangent à la sphère en ce point. On mène par le point C la droite CN normale à la surface, et, comme on le sait, cette normale n'est autre que le rayon de la sphère. Il suffit, pour avoir la direction du rayon réfléchi, de tracer dans le plan des deux lignes CN et CI une droite CR faisant avec CN un angle égal à ICN.



Fig. 534.

1160. **Démonstration expérimentale des lois de la réflexion.** — Pour démontrer ces lois par l'expérience, on se sert d'un petit miroir plan formé soit par une plaque de métal bien polie, ou plus souvent encore par une glace noire. Le miroir PQ (*fig.* 535) est perpendiculaire à un cercle gradué N et son plan coupe ce cercle suivant un diamètre. La graduation commence à partir d'un point N marqué zéro, où le rayon perpendiculaire au diamètre dirigé suivant PQ, et par conséquent au miroir, vient rencontrer le cercle divisé; elle est tracée de part et d'autre de ce zéro jusqu'à la rencontre du plan PQ avec la circonférence. Deux alidades sont mobiles autour d'un axe passant par le centre du cercle; elles portent des tuyaux fermés à leurs extrémités par des plaques qui ne présentent chacune qu'une très-petite ouverture à leur centre. Ces tuyaux servent à marquer la route du rayon incident et du rayon réfléchi, et leurs axes, d'après la construction de l'appareil, forment un plan parallèle au cercle divisé ou bien au plan perpendiculaire au miroir.

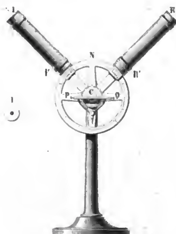


Fig. 535.

On fait pénétrer à travers l'un des tuyaux, celui de gauche II', un rayon de lumière solaire; ce rayon en suit évidemment l'axe lorsque, entrant par la première ouverture I, il peut sortir par la seconde et venir frapper le miroir. On fait tourner alors l'alidade qui porte le tuyau RR' de gauche, et l'on trouve que pour une position convenable de cette alidade, le rayon réfléchi CR parcourt l'axe de ce second tuyau et vient frapper un écran. Ce premier résultat démontre la première loi. Le rayon incident et le rayon réfléchi suivent les axes des tuyaux et par conséquent sont comme ces axes eux-mêmes dans un même plan perpendiculaire au

miroir PQ. Quant à la seconde loi, elle se trouve aussi démontrée, car si l'on mesure sur le cercle gradué les angles formés par chacune des alidades avec la ligne CN, on trouve que ces angles sont toujours égaux.

1161. **Autre démonstration.** — On démontre aussi ces lois en employant pour miroir la surface horizontale (*fig.* 536) formée par un bain de mercure et en se servant pour la mesure des angles d'un cercle vertical HH' devant lequel une lunette RR' est mobile. La lunette tourne autour d'un axe qui est perpendiculaire au cercle gradué et qui passe par son centre. L'axe de la lunette est donc toujours dirigé dans un même plan vertical parallèle à celui du cercle. On vise une étoile, directement avec la lunette qui prend pour cela la position II'. puis on dirige cette lunette vers l'image de l'étoile que

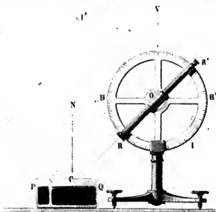


Fig. 536.

renvoie la surface du bain de mercure, et cela sans changer la position du cercle vertical ; il suffit de faire tourner la lunette le long de ce cercle. On trouve que l'angle I'OR' formé par ses deux positions successives est coupé en deux parties égales par la verticale menée au point O.

Ces résultats prouvent les deux lois. En effet CO et OI' sont dans le plan vertical que peut décrire l'axe de la lunette. Mais IC est parallèle à OI' à cause de la distance de l'étoile qui peut être regardée comme infinie. Donc le rayon incident IC ayant un de ses points C dans le plan I'OC doit se trouver tout entier dans ce plan. Les deux rayons IC, OC sont donc dans un même plan vertical, c'est-à-dire perpendiculaire à la surface réfléchissante, qui est horizontale; et la première loi se trouve établie. Quant à la seconde; pour la démontrer, imaginons la normale CN à la surface PQ ; et remarquons que les angles RCN, ICN sont égaux respectivement à I'OV et à VOR' : mais ces derniers angles sont égaux entre eux d'après l'expérience ; donc les angles d'incidence et de réflexion le sont aussi.

1162. **Miroirs plans.** — Les lois précédentes rendent un compte facile de la production des images qui s'offrent aux yeux lorsque l'on regarde une surface réfléchissante plane. Pour en donner la théorie, commençons par considérer l'un des points seulement d'un objet. Soit le point A (*fig.* 537), placé devant la surface réfléchissante PQ. Ce point envoie des rayons

dans toutes les directions, et un grand nombre d'entre eux frappent le miroir; soit AC l'un d'eux. Le rayon réfléchi correspondant s'obtient en menant la normale CN, puis en construisant dans le plan ACN, un rayon CR, dont l'angle avec la normale soit égal à l'angle ACN : CR est le rayon réfléchi. Jusqu'à présent, nous n'avons fait qu'appliquer les règles établies. Maintenant, que l'on imagine le plan ACR qui coupe la surface du miroir suivant CC', que l'on abaisse du point A une perpendiculaire AB sur cette intersection, elle sera perpendiculaire à la surface PQ: enfin cette perpendiculaire rencontrera en A' le prolongement du rayon CR. Or, les deux triangles rectangles ABC et A'BC sont égaux, car ils ont un côté BC commun, et les angles A et A' sont égaux l'un à ACN, l'autre à NCR et par suite égaux entre eux. Par conséquent AB est égal à A'B.

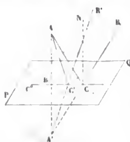


Fig. 537.

Ce résultat s'applique à tous les rayons réfléchis; car CR n'a pas été choisi dans une position particulière, il a été pris au hasard. Il en résulte, que le prolongement de tous les rayons réfléchis coupe la perpendiculaire AA' en un point A' symétrique de A.

Imaginons maintenant l'œil placé sur le trajet des rayons CR, C'R', etc. Comme tous les rayons partis du point A suivent après leur réflexion exactement la même route que s'ils partaient d'un point A' situé derrière le miroir, le spectateur éprouvera la même sensation que si le point A' existait réellement; et il verra en A' l'image du point A.

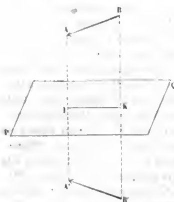


Fig. 538.

1163. Image d'un objet. — Un objet AB (*fig.* 538) est-il placé devant un miroir, l'image A'B' sera donnée en prenant successivement celle des différents points de cet objet. Si AB est rectiligne, l'image A'B' est rectiligne aussi; elle est de même dimension que l'objet, et il suffit d'en tracer les extrémités. En général, si l'on abaisse des différents points d'un objet des perpendiculaires sur le miroir et qu'on les prolonge de quantités égales, les extrémités de ces perpendiculaires ainsi prolongées représentent par leur ensemble l'image cherchée.

1164. Objets visibles dans un miroir. — Un spectateur n'aperçoit dans un miroir qu'une partie seulement des objets situés devant la surface réflé-

chissante. Quand il se déplace, il voit apparaître certaines images qui n'étaient pas visibles auparavant, d'autres au contraire disparaissent qu'il apercevait d'abord. Il est aisé d'en montrer la raison : un point lumineux A (*fig.* 539), placé devant un miroir PQ, ne donne une image A' visible que si une partie des rayons réfléchis arrivent à l'œil. Le spectateur, qui pénètre dans la région de l'espace occupée par les rayons réfléchis, aperçoit A' et cesse de le voir dès qu'il s'écarte de l'espace indiqué. D'après ce qui a été dit plus haut, cet espace sera évidemment limité par les génératrices du cône qu'on engendrerait en faisant tourner une ligne droite qui passerait constamment par le point A' et qui parcourrait le bord même du miroir PQ. La figure 539 montre une section de ce cône par un plan normal à PQ; l'espace R'PQR est celui d'où l'image A' sera visible.

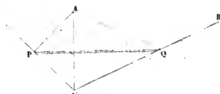


Fig. 539.

1165. **Miroirs faisant un angle.** — Deux ou plusieurs miroirs, faisant un angle, fournissent en général un grand nombre d'images d'un même objet. Un exemple de la marche à suivre, pour déterminer ces images, sera donné ici dans le cas de deux miroirs faisant un angle de 60°. Les surfaces réfléchissantes sont représentées par leurs intersections NM, NM' avec un plan perpendiculaire à leur arête commune (*fig.* 540). Ce plan passe par le point lumineux A ; de plus une circonférence a été tracée : elle a pour centre le point N et pour rayon NA.

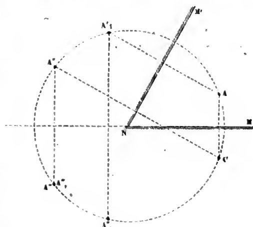


Fig. 540.

Placé devant le miroir NM, le point A forme une image, que l'on obtient en abaissant de ce point une perpendiculaire sur NM et en prolongeant cette perpendiculaire jusqu'à la rencontre de la circonférence en A'. Les rayons, qui tombent sur le miroir NM, donnent alors des rayons réfléchis, qui viennent ensuite rencontrer NM' comme s'ils partaient réelle-

ment du point A'. Par conséquent, A' jouera le rôle d'un point lumineux placé devant le miroir NM', et l'on aura l'image de A' en abaissant de ce point une perpendiculaire sur NM' et en la prolongeant d'une quantité égale à elle-même : cette perpendiculaire se terminera en A'' où elle rencontre la circonférence. Mais une partie des rayons, qui se sont réfléchis sur NM', revient vers NM, et le point A'' joue par rapport à NM, le rôle que jouait A' par rapport à NM'; A'' donnera donc une image A'''. Quant à l'image A''', aucun des rayons qui la forment ne peut venir rencontrer la surface réfléchissante NM' : car tous les rayons réfléchis, qui permettent de l'apercevoir, sont compris entre les prolongements des lignes A'''N et A'''M, et ces prolongements divergent en s'écartant de NM'. Donc, toute nouvelle image ne sera plus possible de ce côté.

Nous n'avons considéré, jusqu'ici, que les images provenant de celle qui avait été formée primitivement par le miroir MN. Les mêmes raisonnements peuvent être recommencés, en considérant l'image A'_1, produite par les rayons qui tombent directement sur NM'. Cette première en donnera une seconde A''_1 formée par le miroir NM, et A''_1 en donnera enfin une troisième A'''_1, qui se confondra avec A'''. On le constate en comptant, sur les arcs de cercle, les distances auxquelles ces images doivent se trouver de A. Nulle autre image ne pourra être obtenue. En général, si les miroirs se rencontrent sous un angle égal à $\frac{1}{n}$ de quatre droits, le nombre des images sera $n-1$.

1166. Miroirs parallèles. — Deux miroirs parallèles MN, M'N' (*fig.* 541)

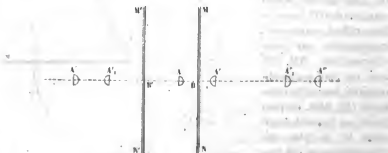


Fig. 541.

font apercevoir un nombre infini d'images, quand un seul objet est placé entre eux. On explique le phénomène en raisonnant comme nous venons de le faire.

Le point A placé devant le miroir MN donne une image A' qui joue le rôle d'un objet pour le miroir M'N' et produit une image A''; A'', pour la

même raison, donne une image A‴ derrière le miroir MN, et ainsi de suite. Cette construction n'a fourni encore que la moitié des images. En effet l'objet A placé devant le miroir M'N' donne une image A'_1, qui forme A″, et ainsi indéfiniment. Une remarque à faire, c'est que, si l'objet n'est pas réduit à un point lumineux, toutes les images dont nous venons de parler ne sont pas identiques : un homme placé entre les deux miroirs et regardant l'un d'eux apercevra, comme notre figure l'indique, son image tournée alternativement dans un sens et dans l'autre.

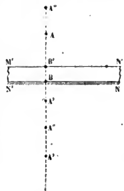


Fig. 542.

1167. Diverses espèces de miroirs. — La théorie, qui vient d'être donnée, s'applique aux miroirs qui possèdent une seule surface réfléchissante. Elle convient par exemple aux miroirs de métal poli qui sont fréquemment employés en physique, et elle explique très-bien les phénomènes de réflexion qui ont lieu à la surface libre des liquides. Mais les glaces ou les miroirs, qui sont le plus en usage, sont en réalité moins simples. La figure 542 représente une coupe de l'un d'eux par un plan perpendiculaire à sa surface. C'est une lame de verre à faces parallèles dont la partie antérieure M'N' est nue, tandis que le côté MN se trouve recouvert d'une feuille d'étain amalgamé. C'est sur ce métal amalgamé que s'opère principalement la réflexion. Quant à la surface M'N', elle réfléchit aussi la lumière, mais elle la réfléchit faiblement, et d'habitude, on n'utilise point les images qu'elle fournit. Les deux surfaces jouent le rôle de deux glaces parallèles. Mais l'œil, à cause de sa position, ne peut voir que la première A' des images données par la surface M'N'; tandis que toutes les images produites par le miroir MN sont visibles. Parmi elles, la première, A″, l'emporte de beaucoup sur toutes les autres par son intensité lumineuse, et la plupart du temps c'est la seule que nous regardons.

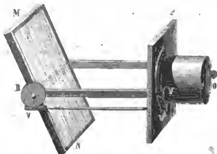


Fig. 543.

1167 *bis*. Porte-lumière. — Les usages des miroirs plans sont si connus, qu'il n'est pas nécessaire d'en parler.

Voici un instrument, qui est employé pour envoyer la lumière solaire dans la chambre noire — le porte-lumière (*fig.* 543), — dont nous devons

dire quelques mots : c'est un miroir plan MN, mobile dans tous les sens possibles, au moyen des vis V' et V''. La plaque PP' est fixée au volet de la chambre, et le miroir exposé au soleil est incliné convenablement pour que le rayon solaire entrant par l'ouverture O tombe sur les appareils mis en expérience.

MIROIRS SPHÉRIQUES CONCAVES.

1168. **Définition**. — Parmi les différentes courbures, que peuvent présenter les surfaces réfléchissantes, il en est une qui leur donne la propriété de produire une image nette des objets mis en présence, image amplifiée ou réduite, mais sans déformation sensible. Dans ce cas est la surface sphérique qui, après la surface plane, est la plus facile à obtenir avec quelque perfection ; et jusqu'aux essais heureux de M. Foucault, qui datent de ces dernières années, l'optique n'en avait jamais utilisé d'autres.

Il y a deux espèces de miroirs sphériques, les uns concaves formés par une portion de sphère polie à l'intérieur ; les autres convexes sont constitués par une calotte sphérique polie à l'extérieur.

Dans l'étude de la réflexion sur ces miroirs, comme dans celle qui se rapportait aux miroirs plans, nous commencerons par rechercher l'image d'un point, parce qu'il sera facile de passer de ce cas simple au cas plus complexe de l'image d'un objet. Nous supposerons d'abord ce point placé sur l'axe principal : il sera ensuite aisé de continuer la même étude pour un point quelconque.

1169. **Axe principal.** — Le miroir concave est ici figuré par un arc

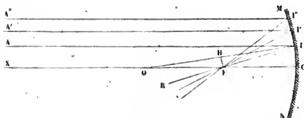


Fig. 544.

de cercle MN (*fig.* 544) qui représente l'intersection de la calotte sphérique par un plan passant par le centre de figure C du miroir et par le centre O de la sphère dont le miroir fait partie. La ligne COX qui joint ces deux derniers points porte d'ailleurs le nom d'*axe principal*.

1170. Foyer principal. — Parmi les positions qu'un point lumineux peut occuper sur l'axe principal, il en est une importante : celle où il est si éloigné du miroir que tous les rayons qui tombent sur la surface réfléchissante arrivent parallèles entre eux et à l'axe principal du miroir. Ce cas se présente lorsque le miroir concave est dirigé vers le ciel et que le prolongement de son axe rencontre une étoile. Un de ces rayons AI (*fig.* 544) frappe le miroir au point I ; il s'agit de déterminer la marche du rayon réfléchi. Les lois de la réflexion nous permettent de résoudre immédiatement cette question. Il faut mener la normale qui n'est autre que le rayon OI de la sphère ; puis on fait passer le plan AIO qui coupe la surface réfléchissante suivant l'arc de cercle MN ; le rayon réfléchi suit, dans ce plan, une ligne IR, qui fait avec OI un angle égal à l'angle d'incidence. Toutes ces lignes étant dans un même plan, la ligne IR coupera l'axe principal en un point que nous appellerons F.

Ce point F occupe sur l'axe une position qu'il faut bien connaître, et nous allons montrer qu'il est, à très-peu près, à égale distance des deux points C et O. En effet, le triangle IFO est isocèle, car les angles I et O sont égaux à l'angle d'incidence AIO ; le premier, parce qu'il n'est autre que l'angle de réflexion, et le second, c'est-à-dire l'angle O, parce que, à cause des deux parallèles AI, CO et de la sécante IR, les angles AIO et O sont alternes-internes : on a donc *exactement* IF égal à FO. Si maintenant le point I est tel que l'arc IC soit d'un petit nombre de degrés, on aura, *à très-peu près*, IF = FC, et, à cause de l'égalité précédente, il viendra alors FC = FO. Le rayon AI est un quelconque des rayons parallèles qui arrivent au miroir; il vient d'être démontré que le rayon réfléchi correspondant rencontre l'axe sensiblement au milieu de CO ; on peut dire, en conséquence, que tous les rayons parallèles à l'axe donnent des rayons réfléchis, qui coupent à peu près tous cet axe au même point : ce point s'appelle le *foyer principal*, et la distance CF est dite la *distance focale principale* du miroir.

Il ne faut pas oublier toutefois que notre démonstration repose sur cette supposition que l'arc IC est d'un petit nombre de degrés. Dans la pratique, les miroirs sont tellement construits que cet arc ne dépasse guère 5°, valeur qui est, par suite, celle de l'arc total CN ou CM. A cette condition, notre hypothèse est admissible, et le milieu de CO peut être pris comme le point de rencontre de tous les rayons parallèles à l'axe.

1171. Aberrations de sphéricité. — Quelle erreur commet-on en prenant OF = FC ? C'est ce que l'on peut déterminer exactement. En effet, supposons que le rayon AI, qui donne naissance au rayon réfléchi IF, tombe sur le bord extrême du miroir et que l'on abaisse une perpendiculaire FH du point F sur la ligne IO, on a

$$\mathrm{HO} = \mathrm{IH} = \mathrm{OF} \cos \omega,$$

en appelant ω l'angle IOF. Mais HO est la moitié du rayon, donc :

$$OF \cos \omega = \frac{R}{2},$$

d'où :

$$OF = \frac{R}{2 \cos \omega}.$$

Pour les rayons qui frappent le miroir tout près du centre $\cos \omega = 1$; pour ceux-là, $OF = \frac{R}{2}$; dans ce cas, les rayons rencontrent donc l'axe à une distance du centre $CF = \frac{R}{2}$. Pour un arc IC de 5°, on trouve que $\cos \omega$ est égal à 0,996, donc :

$$OF_1 = \frac{R}{2 \times 0{,}996},$$

quantité dont $\frac{R}{2}$ ne diffère que de $\frac{1}{250}$ environ, différence assez petite pour que, dans certaines applications des miroirs, on puisse souvent admettre

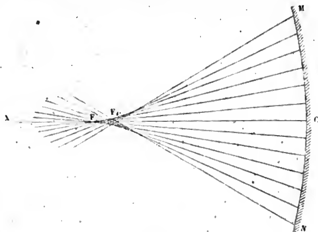


Fig. 545.

que le point F_1 est aussi au milieu du rayon CO. Toutefois, dans la réalité, les rayons parallèles à l'axe, qui tombent sur le miroir, forment un faisceau de rayons réfléchis qui rencontrent cet axe, non en un point unique, mais le coupent en une série de points formant une longueur qu'on appelle *aberration longitudinale* de sphéricité. On voit sur la figure 545 la marche

des rayons réfléchis. La distance FF_1 est l'aberration du miroir, aberration que nous avons exagérée pour la rendre sensible.

Si l'on place un écran en F, où les rayons centraux viennent rencontrer l'axe, l'écran, au lieu d'être éclairé en un point seulement, se trouvera illuminé sur une surface dont le rayon détermine ce que l'on appelle l'*aberration latérale* de sphéricité. Il est possible de l'évaluer ; mais nous ne nous y arrêterons pas.

1172. Expériences. — Voici des expériences qui confirment les résultats de la théorie. Sur un miroir sphérique concave (*fig.* 546) placé devant



Fig. 546.

le volet d'une chambre noire, on renvoie les rayons solaires au moyen d'un porte-lumière ; le volet, percé de petits trous, que l'on peut déboucher à volonté, laisse passer de minces faisceaux que dans l'obscurité on voit apparaître à cause des poussières qu'ils éclairent sur leur passage : ce sont les rayons incidents parallèles. L'un des rayons reçu au centre de figure C du miroir donne un rayon réfléchi qui suit exactement la direction du rayon incident. La ligne lumineuse qui marque la route commune de ces deux rayons est normale au miroir en C ; c'est donc l'axe principal. Tous les rayons réfléchis coupent cet axe en un même point, comme cela apparait dans l'obscurité, exactement ainsi que le montre la figure tracée ici. Si l'on mesure la distance depuis le point de rencontre jusqu'au miroir, on trouve qu'elle est égale à la moitié du rayon de la surface sphérique.

Au lieu de faire tomber les rayons un à un, ainsi que nous l'avons fait, que l'on ouvre une large ouverture, un faisceau entre, couvre le miroir entier, et les rayons réfléchis forment un cône de rayons qui convergent en F et divergent ensuite à partir de ce point.

1172 *bis*. Mesure de la distance focale d'un miroir concave. — Cette

expérience donne la distance focale CF d'un miroir, distance qu'il est très-important de connaître. D'habitude, pour la déterminer, on opère plus simplement ; une chambre noire n'est pas nécessaire. On expose le miroir à la lumière solaire directe, et l'on cherche, par tâtonnement, quel est le point où un écran doit être placé pour que la lumière réfléchie s'y concentre dans le plus petit espace possible : on a ainsi le foyer principal, dont on mesure alors directement la distance au miroir pour avoir la distance focale cherchée.

1173. **Foyers conjugués. — Expériences.** — Dans la chambre noire et sur l'axe d'un miroir on place un point lumineux P très-brillant, donné

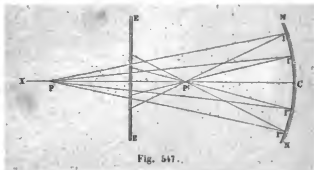


Fig. 547.

soit par une lampe électrique, soit par la lumière solaire concentrée par un un appareil optique. Ce point est derrière un écran percé de trous. Un rayon qui tombe sur le miroir et revient sur lui-même après la réflexion sert à marquer l'axe principal du miroir MN, comme nous l'avons déjà indiqué dans l'expérience précédente. On reconnaît de la même manière que tous les rayons incidents qui frappent le miroir se rencontrent après la réflexion en un même point P' situé sur l'axe. Ce point P' est appelé le *foyer conjugué* du point P.

1174. **Discussion géométrique.** — La position du foyer conjugué d'un point lumineux est importante à connaître ; deux méthodes peuvent être employées pour la déterminer : l'une géométrique, l'autre algébrique. Commençons par la première. Figurons d'abord un rayon AI (*fig.* 548) parallèle à l'axe CX et le rayon réfléchi IF qui passe par le foyer principal ; traçons de plus la normale IO au point I. Dans cette figure, que nous allons employer dans la discussion, nous savons que les angles AIO et OIF sont égaux.

Ceci posé, soit P le point lumineux, situé au delà du centre ; je mène un rayon incident PI ; ce rayon fait avec la normale IO un angle plus petit que celui que fait AI ; le rayon réfléchi devra donc faire avec cette normale un angle plus petit que OIF, passer entre IO et IF et couper l'axe en un point P'

compris entre O et F. Ce point obtenu est le foyer conjugué du point P, car tous les rayons réfléchis (1173) coupent l'axe en un même point : l'un

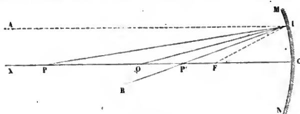


Fig. 518.

d'eux vient en P', c'est en ce point qu'ils doivent tous concourir. En définitive le foyer cherché est compris entre le centre et le foyer principal.

Si le point P est très-éloigné, l'angle PIO ne différera pas beaucoup de l'angle AIO; le point P' sera très-près du point F. A mesure que le point P avancera, l'angle PIO diminuera et le point P' se rapprochera du point O. Enfin, lorsque le point P sera au point O, le point P' coïncidera avec lui. Ainsi nous voyons que si un point lumineux mobile chemine en s'approchant du miroir depuis l'infini jusqu'au centre O, le foyer conjugué va en s'éloignant du miroir, mais il ne parcourt alors que la distance FO.

Fait-on marcher le point P depuis O jusqu'en F, on lui fera prendre ainsi successivement les différentes positions qu'occupait le foyer P', les rayons incidents suivront alors une route telle que P'I, et réciproquement les rayons réfléchis reviendront suivant IP : le foyer conjugué prendra toutes les positions qu'avait occupées précédemment le point P ; il ira du point O jusqu'à l'infini.

1175. **Résumé.** — Ainsi, les deux foyers conjugués marchent toujours en sens contraire l'un de l'autre, et ce qui précède peut être résumé de la manière suivante : 1° Tout point lumineux situé sur l'axe, au delà du centre, a son foyer conjugué entre le foyer principal et le centre ; 2° quand le point lumineux se rapproche du centre, son foyer conjugué s'en rapproche aussi, et quand il arrive au centre, il est en coïncidence avec son foyer conjugué ; 3° quand le point lumineux est situé entre le centre et le foyer principal, le foyer conjugué est au delà du centre et s'éloigne d'autant plus que le point lumineux se rapproche davantage du foyer principal; 4° quand le point lumineux est au foyer principal, son foyer conjugué est à l'infini, c'est-à-dire que les rayons se réfléchissent parallèlement à l'axe du miroir.

Ou plus brièvement : Si le point lumineux avance depuis l'infini jusqu'au foyer principal, son foyer conjugué va inversement depuis le foyer principal jusqu'à l'infini. La rencontre se fait au centre du miroir.

1176. **Foyers virtuels.** — Si le point P (*fig.* 549) dépasse le foyer F et

vient se placer entre le miroir et le foyer principal, il n'y a plus de point de rencontre possible pour les rayons réfléchis. En effet, le rayon PI fait alors avec la normale un angle plus grand que OIF ; le rayon réfléchi IR doit

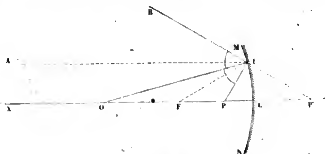


Fig. 549.

alors s'écarter de la normale OI, plus que ne le fait le rayon parallèle IA. Il va donc toujours en s'éloignant de l'axe et ne peut le rencontrer qu'à la condition qu'on le prolongera derrière le miroir jusqu'en P'.

Si les prolongements des rayons rencontrent l'axe tous au même point, l'œil placé devant le miroir recevra ces rayons comme s'ils émanaient d'une source de lumière qui occuperait la position de ce point derrière le miroir. L'expérience montre pleinement ce résultat : un point lumineux étant placé entre le foyer principal et le miroir, on voit son image apparaître derrière le miroir comme dans le cas du miroir plan. Le point P' est nommé pour ce motif *foyer virtuel*.

Quand le point P sera très-près de F, le rayon IR sera presque parallèle à l'axe, et le foyer virtuel se formera extrêmement loin ; mais à mesure que P s'approche du miroir, le rayon IR s'écarte de plus en plus de l'axe et le point P' va toujours s'approchant du miroir. Enfin quand P est très-voisin de la surface, P' tend, lui aussi, à se confondre avec elle.

1177. **Formule algébrique.** — Cherchons maintenant à résoudre la même question par le calcul : ce qui n'est pas sans importance, car le calcul ne nous donnera pas seulement la région où se trouve le foyer conjugué, mais il en fournira la position exacte. La relation de position entre P et P' se détermine de la manière suivante. La ligne OI (*fig.* 550) partage en deux parties égales l'angle I du triangle PIP', par conséquent elle divise la base PP' en deux parties proportionnelles aux côtés adjacents : on a donc $\frac{PO}{P'O} = \frac{PI}{P'I}$ (1). Si l'on pose $OC = R = 2f$, $CP = p$. $CP' = p'$, et si l'on admet, à cause de la petitesse de l'angle IOC que l'on ait très-approximativement $PI = PC$, $P'I = P'C$, on pourra écrire en remplaçant

dans (1) PO, P'O, PI, P'I par leurs valeurs : $\frac{p-2f}{2f-p'}=\frac{p}{p'}$. Chassons les dénominateurs, il vient $pp'-2fp'=2fp-pp'$, ou bien $2fp+2fp'=2pp'$. Enfin, si l'on divise chacun des termes par le produit $2fpp'$, on a :

$$\frac{1}{p'}+\frac{1}{p}=\frac{1}{f} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (a),$$

formule aisée à retenir. Elle unit entre elles les trois quantités f, p et p' :

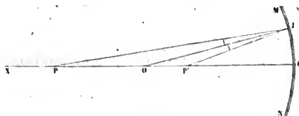


Fig. 550.

ainsi elle détermine p' la distance du point où l'axe principal est rencontré par le rayon réfléchi quand f et p sont données.

1178. **Remarques sur le calcul.** — Cette formule est indépendante de l'inclinaison du rayon PI, elle se rapporte donc à tout rayon lumineux partant du même point P, et au rayon réfléchi correspondant qui coupera l'axe à une distance déterminée p'. Mais si ce résultat est contenu dans la formule, il importe de voir comment il s'y est introduit et de bien constater que si l'angle qui mesure l'inclinaison des rayons n'entre pas dans la valeur de p', cela tient à ce que nous l'avons supprimé nous-mêmes. Cette suppression nous l'avons faite, quand nous avons écrit que PI et P'I pouvaient être considérés comme égaux à PC et à P'C. Dans la formule finale se retrouvent, en définitive, les hypothèses introduites dans le courant du calcul ; et à regarder de près ce qui a été mis en équation, la valeur de p' ne peut nous donner que la distance focale des rayons qui rasent l'axe. Un calcul complet prouverait d'ailleurs qu'un même point P' n'est pas le foyer de tous les rayons partis de P, que tous les rayons réfléchis ne convergent pas rigoureusement en un même point : il y a une aberration longitudinale ; mais elle est très-petite, si l'ouverture du miroir est elle-même d'un petit nombre de degrés.

1179. **Discussion de la formule.** — La formule $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$ qui peut être mise sous la forme

$$p'=\frac{pf}{p-f} \quad \ldots\ldots\ldots (b),$$

donne très-simplement les résultats que nous avons déduits (1174) de considérations géométriques. En la discutant on aura le tableau suivant :

$p = \infty$	$p' = f$
p diminue	p' grandit
$p = 2f$	$p' = 2f$
$p < 2f$ et $> f$.	$p' > 2f$
$p = f$	$p' = \infty$
$p < f$	$p' < 0$
$p = 0$	$p' = 0$

Tous ces résultats s'obtiennent sans difficulté, le seul cas, qui pourrait offrir quelque embarras, est celui où l'on ferait $p = \infty$, toute difficulté disparait si l'on divise par p les deux termes de l'expression fractionnaire : la formule devient alors $\frac{f}{1-\frac{f}{p}}$ et si l'on fait $p = \infty$, $\frac{f}{p}$ devient nul et p' est égal à f.

Les considérations purement géométriques avaient conduit aux mêmes conséquences ; mais la formule a cet avantage, qu'elle donnera, au besoin, la valeur de p'. Ainsi, soit un miroir dont le rayon est égal à 2 mètres ; soit un point lumineux situé à la distance de 9 mètres : on trouvera la distance du foyer conjugué au miroir en substituant 9 à la place de p, et la moitié du rayon, c'est-à-dire 1, à la place de f. On aura :

$$p' = \frac{9 \times 1}{9-1} = \frac{9}{8} = 1^{m},125.$$

La formule (b) donne une valeur négative de p' lorsque p est plus petit que f, valeur qui indique que la longueur p' doit être alors comptée non de C vers X, mais en sens contraire : ce qui donne le foyer virtuel. Si l'on voulait la valeur absolue de p' dans ce cas particulier, il faudrait dans la formule changer le signe de cette quantité ; on aurait ainsi :

$$p' = \frac{pf}{f-p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (c).$$

1180. **Axes secondaires.** — Toute ligne droite telle que C'X' (*fig.* 551), qui passe par le centre de courbure O du miroir MN, possède les mêmes propriétés que l'axe principal ; on l'appelle, à cause de cela, axe secondaire.

Pour comprendre que l'axe secondaire est identique, par ses propriétés, avec l'axe principal, il suffit de remarquer que si on augmentait la surface du miroir MN de N en N' jusqu'à ce que C' fût à égale distance de tous les points du bord du miroir ainsi augmenté, C'X' se trouverait être l'axe principal de ce nouveau miroir MN', et nous pourrions dire : Tous les rayons parallèles à l'axe C'X' viennent converger après réflexion au point F', situé au milieu du rayon C'O. Que l'on retranche la partie NN'

qui a été ajoutée, les rayons parallèles qui tombaient sur elle ne donneront plus de rayons réfléchis; mais cette circonstance n'empêchera pas

Fig. 551.

évidemment les autres rayons de se réfléchir comme ils le faisaient auparavant, et de converger encore au point F'. Ainsi, tous les rayons parallèles à un axe secondaire ont un foyer F' que nous appellerons le foyer principal de l'axe secondaire.

1180 *bis*. De même, si l'on prend un point lumineux L sur l'axe secondaire C'X', à ce point lumineux correspondra un foyer conjugué, situé sur cet axe secondaire et la relation $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$ sera aussi la relation qui unit la distance focale f, et les distances p et p' au miroir de L et de son foyer conjugué. Le raisonnement, qui vient d'être fait pour les rayons parallèles, est en effet applicable, sans modification, au cas actuel.

Il ne faut pas croire toutefois qu'il est indifférent pour la netteté des images de prendre un point lumineux sur l'axe principal ou en dehors de cet axe. A mesure que l'angle fait par C'X' avec l'axe principal va en grandissant, cette ligne devient l'axe d'un miroir d'un nombre de degrés plus considérable, et alors, comme nous l'avons déjà dit (1170), les aberrations de sphéricité s'accroissent. L'image du point lumineux devient un cercle d'un plus grand rayon et toute netteté finit par disparaître.

1181. **Image des objets.** — Maintenant nous sommes en mesure de tracer l'image d'un objet AB (*fig.* 552) placé devant un miroir sphérique concave.

Commençons par chercher celle de l'un des points A de l'objet. Tous les rayons qui émanent de A doivent, après leur réflexion, rencontrer l'axe secondaire AC' (1180 *bis*) en un même point. Or, le rayon AI parallèle à l'axe principal CX donne un rayon réfléchi qui passe par le point F milieu de la ligne CO, et qui continuant sa marche coupe l'axe AC' en un point A'; donc tous les autres rayons émanés de A viendront en ce point A', qui est

le foyer cherché. L'œil placé en avant de A', sur le trajet des faisceaux qui se sont croisés en ce point, éprouve la même sensation que si A' était un

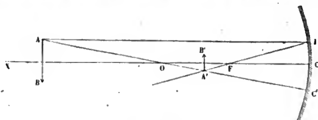


Fig. 552.

point lumineux; un écran placé en A' sera éclairé en ce point et l'image de A qui y sera produite pourra être cette fois aperçue par un observa-

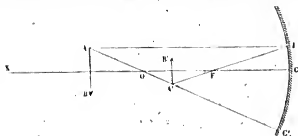


Fig. 553.

teur placé dans une position quelconque par rapport à l'écran : A' est bien l'image du point A. On aura de même le foyer B' du point B et celui des

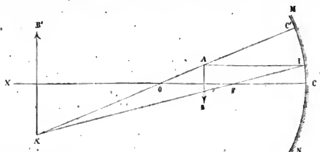


Fig. 554.

points intermédiaires : l'image A'B', ainsi obtenue, est, sans déformation considérable, l'exacte représentation de AB, mais elle est renversée.

Les figures 552, 553, 554 et 555 représentent la construction faite pour

diverses positions de l'objet, et elles correspondent à plusieurs cas particuliers : 1° l'image est plus petite que l'objet (*fig.* 552 et 553), toutes les

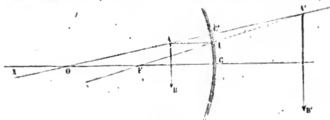


Fig. 555.

fois que ce dernier est au delà du centre et d'autant plus petite qu'il est plus éloigné. 2° L'image est plus grande que l'objet (*fig.* 554) quand celui-ci est entre le centre et le foyer principal. 3° Elle est égale en grandeur à l'objet et toujours renversée quand l'objet est au centre de courbure du miroir. Enfin 4° l'image virtuelle que l'on obtient (*fig.* 555) quand l'objet est placé entre le miroir et le foyer principal est droite ; elle est toujours plus grande que l'objet, mais elle va en diminuant à mesure que l'objet s'approche du miroir.

1182. Expériences. — Tous ces résultats sont confirmés, dans la chambre noire, par une expérience qui consiste à placer une bougie AB (*fig.* 556)

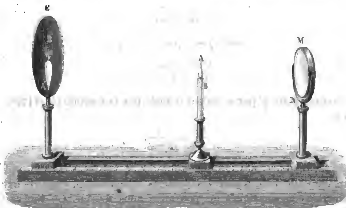


Fig. 556.

au-devant d'un miroir sphérique concave MN et à recevoir l'image sur un écran. Quand la bougie est très-loin, on voit sa petite image renversée se peindre sur l'écran. A mesure que la bougie s'approche, l'image grandit,

et l'on est obligé, pour la recevoir, d'écarter l'écran du miroir. Le rapprochement continuant toujours, on voit, quand la bougie est au centre, que son image toujours renversée est aussi au centre et de même grandeur que l'objet, quand la bougie dépasse le centre; et c'est le cas de notre figure, l'image renversée est au delà du centre et agrandie. En un mot, tous les résultats que l'on observe sont ceux qui viennent d'être indiqués dans le paragraphe précédent.

Cette expérience sert à vérifier la formule $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$. Pour cela la bougie étant à une position fixe, on mesure la distance à laquelle elle se trouve du miroir : ce qui donne p; on mesure la distance à laquelle l'écran doit être placé pour recevoir l'image : ce qui donne p' et par suite $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}$, on trouve ainsi que pour toute position de la bougie, cette somme est constante. Si une expérience préalable a donné le rayon du miroir, on vérifie que cette somme est égale à $\frac{1}{f}$, f étant la moitié du rayon. Les mesures se prennent aisément avec l'appareil qui est sous les yeux du lecteur : le pied des instruments se meut dans une rainure dont les bords sont divisés en millimètres.

1183. **Calcul de la grandeur relative de l'image et de l'objet.** — Considérons la figure qui a servi à obtenir l'image d'un objet, dans le cas où cette image est réelle (*fig.* 552). Les deux triangles AOB, A'OB' sont semblables comme ayant leurs angles égaux ; donc

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{OA'}{OA},$$

mais

$$OA=p-2f, OA'=2f-p'.$$

Donc :

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{2f-p'}{p-2f}$$

et si l'on remplace p' par sa valeur donnée par la formule (*b*) (1179), on a enfin :

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{f}{p-f}.$$

La discussion de cette formule nous donne les rapports de grandeur de l'image et de l'objet pour les diverses valeurs de p, rapports que les constructions géométriques ne pouvaient nous fournir. On voit alors la confirmation de ce résultat expérimental : pour $p>2f$, on a $A'B'<AB$; pour $p=2f$, il vient $A'B'=AB$; et enfin $p<2f$ donne $A'B'>AB$.

Dans le cas où l'image est virtuelle, on a semblablement

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{OA'}{OA}=\frac{2f+p'}{2f-p}.$$

Remplaçant p' par sa valeur $\frac{pf}{f-p}$ donnée par l'équation (c) (1179), on a $\frac{A'B'}{AB}=\frac{f}{f-p}$. On voit de suite que l'image est toujours plus grande que l'objet, et d'autant plus grande que p s'approche davantage d'être égal à f; c'est-à-dire qu'elle augmente à mesure que l'on place l'objet plus près du foyer principal.

MIROIRS SPHÉRIQUES CONVEXES.

1184. **Axe principal, foyer principal, foyers conjugués.** — L'axe principal d'un miroir sphérique convexe se définit comme l'axe principal d'un miroir concave, c'est la ligne CX (*fig.* 557) qui passe par le centre de courbure O du miroir, et par le centre de figure C.

Les rayons parallèles à l'axe principal, tels que AI, suivent après la

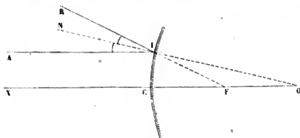


Fig. 557.

réflexion, une marche qui est bien différente de celle que leur donne un miroir concave. Les rayons réfléchis ne peuvent aller se couper effectivement en aucun point de l'axe; tout au contraire, ils divergent et cheminent comme s'ils provenaient tous d'un même point F, situé sur l'axe, et placé derrière le miroir à égale distance du centre O et de la surface réfléchissante. Par l'expérience, on pourrait le démontrer, en employant une méthode analogue à celle qui nous a servi pour les miroirs concaves; seulement ici il faudrait marquer la trace des rayons réfléchis d'une manière durable, et ensuite retirer le miroir et constater que les rayons prolongés vont tous au même point. Mais le plus simple consiste à se placer sur la route de la lumière réfléchie; lorsque les rayons parallèles à l'axe tombent sur le miroir, l'œil frappé par les rayons réfléchis n'aperçoit qu'un point lumineux.

Par le raisonnement, on le démontre, comme pour les miroirs sphériques concaves, en menant la normale OI, le rayon réfléchi IR, et son prolongement IF, et en faisant voir que le triange OIF est isocèle. Si l'on admet de plus que FI peut être considéré comme égale à FC, on a OF = FC,

Ce point F est le foyer principal du miroir, mais c'est un *foyer virtuel*.

Par l'expérience, la distance focale FC se détermine en recouvrant le miroir d'un disque opaque percé de deux petites ouvertures. L'axe étant dirigé vers le soleil, deux rayons seulement atteignent le miroir, se réfléchissent et reviennent en divergeant : on les reçoit sur un écran que l'on déplace jusqu'à ce que les centres des deux points éclairés soient à une distance égale à deux fois celle des ouvertures; il est aisé de démontrer que l'écran est éloigné du miroir d'une longueur égale à la distance focale principale.

Un point lumineux P (*fig.* 558) étant placé sur l'axe, les rayons qui par-

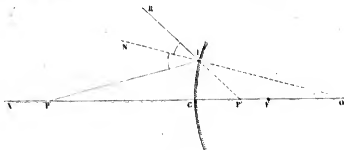


Fig. 558.

tent de ce point donnent des rayons réfléchis, tels que IR, qui vont en divergeant comme partant d'un point P' situé derrière le miroir. Par l'expérience on le démontrerait comme nous venons de le dire pour les rayons parallèles. La relation qui existe entre $CP = p'$, $CP' = p'$ et $OC = 2f$ s'établit comme pour les miroirs convexes. Seulement ici, dans le triangle PIP', la normale ne coupe plus en deux parties égales l'angle au sommet, elle coupe ainsi l'angle PIR, c'est-à-dire le supplément de l'angle au sommet. D'après un théorème connu, on aura : $\frac{PO}{P'O} = \frac{PI}{P'I}$ ou $\frac{2f+p}{2f-p'} = \frac{p}{p'}$, d'où l'on déduit

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f} \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (d)$$

1185. Discussion. — L'égalité précédente donne : $p' = \frac{pf}{p+f} = \frac{f}{1+\frac{f}{p}}$. Si $p = \infty$, c'est-à-dire si les rayons tombent sur le miroir convexe parallèlement à l'axe, $p' = f$; si le point lumineux P se rapproche du miroir, p diminue, $\frac{f}{p}$ augmente, et p' diminue; donc, quand le point lumineux se rapproche du miroir, son foyer conjugué s'en rapproche aussi, et les deux foyers mar-

chent en sens contraires; quand p est égal à zéro, p' aussi devient nul, le point et son foyer conjugué se confondent avec la surface du miroir.

1186. **Axes secondaires.** — Toute ligne, qui passe par le point O, est un axe secondaire, et comme pour les miroirs sphériques concaves, tout ce qui a été dit relativement à l'axe principal est vrai pour les axes secondaires.

1187. **Détermination des images.** — L'image d'un objet AB se construit exactement en suivant la méthode employée dans la théorie des miroirs concaves. Soit un objet AB (*fig.* 559) placé devant le miroir MN.

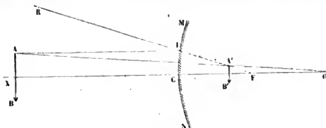


Fig. 559.

L'image du point A se trouve sur l'axe secondaire AO, passant par ce point. De tous les rayons qui partent de A, il en est un AI qui marche parallèlement à l'axe principal, celui-là donne un rayon réfléchi IR, dont le prolongement passe par le foyer principal F, et rencontre l'axe secondaire en A'. Or, nous savons que les rayons réfléchis prolongés doivent rencontrer tous cet axe secondaire au même point : A' est donc le foyer virtuel de A. De même, B' est le foyer du point B. L'œil placé devant le miroir verra en A'B' l'image droite et virtuelle de AB.

Quelle que soit la position de AB, la hauteur de l'image A'B' et celle de l'objet sont deux lignes parallèles comprises dans le même angle AOB et l'image est toujours plus voisine du sommet de l'angle que l'objet : donc elle est plus petite que lui. Mais plus l'objet sera éloigné, plus l'image sera petite et voisine du point F. A mesure que l'objet s'approche, l'image grandit et prend une position plus voisine du miroir. Quand l'objet est très-près du miroir, l'image en est aussi très-près, et elle est presque égale en grandeur à l'objet.

Les relations de grandeur de l'image et de l'objet se tirent de la similitude des deux triangles AOB et A'OB', qui donnent $\frac{A'B'}{AB}=\frac{OA'}{OA}$; mais on a $OA'=2f-p'$, $OA=2f+p$, donc :

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{2f-p'}{2f+p};$$

substituant à la place de p' sa valeur $\frac{pf}{p+f}$, tirée de l'équation (d), on a :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{f}{p+f}.$$

Cette équation nous montre que A'B' est toujours plus petit que AB, car f est nécessairement plus petit que $p + f$. Si p augmente, c'est-à-dire si l'objet s'éloigne du miroir, la fraction $\frac{f}{p+f}$ diminue, l'image devient de plus en plus petite par rapport à l'objet.

1188. **Expérience.** — L'expérience qui consiste à approcher ou à éloigner une bougie d'un miroir sphérique concave (**1182**), peut se répéter aussi avec un miroir sphérique convexe, avec cette différence qu'il faut regarder dans le miroir ; on aperçoit l'image virtuelle de la bougie, qui est toujours droite et plus petite que l'objet. On voit l'image grandir quand la bougie est rapprochée du miroir.

1189. **Objet virtuel.** — Les miroirs sphériques convexes sont utilisés en optique dans un cas particulier dont il n'a pas encore été question ; c'est le cas où l'objet est virtuel. Voici les conditions dans lesquelles cette circonstance peut se présenter. Un miroir sphérique concave M'N' (*fig.* 560), placé devant un objet AB, donne une petite image A'B' de cet objet ; les

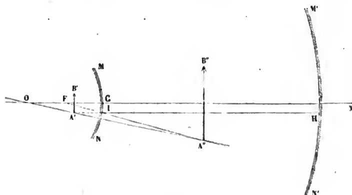


Fig. 560.

rayons qui forment cette image marchent de M'N' vers A'B'. On interpose un petit miroir convexe MN sur le trajet des rayons qui viennent ainsi ; l'image A'B' ne se forme plus, et la question est de savoir ce que deviennent les rayons qui sont ainsi interceptés par le miroir MN. On parvient à la résoudre en généralisant la construction déjà employée. Examinons le cas le plus important, celui où la surface du miroir MN vient se placer

à une distance de A'B' moindre que la distance focale CF. On raisonne de la manière suivante : L'image du point A' doit se former sur l'axe secondaire de ce point ; on trace cet axe A'O. Parmi tous les rayons qui auraient contribué à former l'image A', il en est un HI qui arrivait parallèlement à l'axe ; ce rayon, après sa réflexion, suit une route IA'' telle que son prolongement rencontre l'axe principal au point F. Il ira d'autre part rencontrer l'axe secondaire au point A'', et l'on est porté à admettre qu'en ce même point vont passer tous les rayons qui eussent formé l'image A', si ces rayons se dirigeant sur le miroir, n'avaient pas été interceptés et réfléchis par lui ; de même B'' sera l'image de B'.

Mais il ne suffit pas d'étendre la construction à un cas qui n'avait pas été prévu, il faut voir si l'analogie n'a pas été trompeuse. On le reconnaîtra, soit en reprenant tous les raisonnements précédents et en s'assurant qu'ils s'appliquent au cas actuel, soit en recourant à l'expérience. C'est cette dernière méthode qui convient ici, et le résultat s'accorde parfaitement avec celui qui vient d'être trouvé.

Si l'on avait voulu se borner au cas où l'objet virtuel se trouve entre F et C, il aurait suffi de s'approprier la loi de réciprocité du rayon incident et du rayon réfléchi. Un objet A''B'' placé devant un miroir convexe donnerait une image virtuelle A'B' entre le miroir et le foyer, c'est-à-dire que les rayons tels que A''I se réfléchiraient suivant IH, et leurs prolongements donneraient l'image virtuelle A' (1187). On peut dire réciproquement que si des rayons viennent suivant HI vers A', ils doivent se réfléchir suivant IA'', et former une image réelle A''. Si cette dernière méthode n'a pas été préférée, c'est qu'elle ne s'applique qu'à une position particulière de A'B' : celle où cet objet virtuel se trouverait entre le foyer et le miroir ; tandis que la première construction que nous avons fait connaître, tout à fait générale.

CHAPITRE III

DE LA RÉFRACTION.

1190. **Définition.** — Un rayon de lumière, qui passe d'un corps dans un autre, se brise à la surface de séparation des deux milieux : il change brusquement de direction, et après ce changement brusque il continue à se mouvoir en ligne droite, tant qu'il se propage dans une même substance homogène. La déviation, qui vient d'être signalée, s'appelle la ***réfraction ;***

elle a toujours lieu au changement de milieu. Dans un cas, toutefois, celui où le rayon incident est perpendiculaire à la surface, qui sépare les deux substances transparentes, la lumière continue sa marche sans être déviée.

1191. Faits d'observation. — L'expérience journalière offre fréquemment à nos yeux des phénomènes de réfraction. Les objets situés dans l'eau, par exemple, ne nous semblent pas à la place qu'ils occupent réellement : celui qui veut les atteindre là où l'œil les aperçoit, s'égare et frappe à côté.

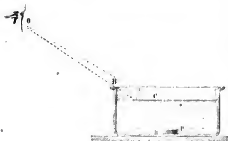


Fig. 561.

Chacun peut faire très-aisément une expérience qui met le phénomène en évidence. Au fond d'un vase, on place une pièce de monnaie P (*fig.* 561), que, pour plus de sécurité, on fixe avec de la cire. Un spectateur O, qui la regarde s'écarte ou se baisse jusqu'à ce qu'elle lui soit tout entière cachée par les bords du vase : dès qu'il a obtenu ce résultat, il s'arrête et reste immobile. Un aide vient-il à verser de l'eau dans le vase vide, la pièce de monnaie reparaît aussitôt; la paroi ne la cache plus. Il faut donc que les rayons lumineux, qui dans l'eau comme dans l'air se propagent en ligne droite, aient subi une déviation ; il faut que des rayons tels que PC aient pris une direction telle que CO, en passant de l'eau dans l'air ; sans cela ils n'auraient pas pu parvenir à l'observateur.

Dans les cours, on montre très-simplement la réfraction de la lumière en faisant tomber un faisceau de lumière solaire sur l'eau d'une grande

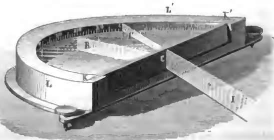


Fig. 562.

cuve dont la paroi est transparente en C (*fig.* 562). L'expérience étant faite dans la chambre noire, on aperçoit la ligne droite suivie par le

faisceau incident IC, dont l'une des moitiés CI' continue sa route au-dessus de l'eau; on voit aussi très-bien par l'illumination, produite sur le trajet du rayon qui traverse l'eau, que ce rayon se brise et prend une direction telle que CR. Si l'on fait tomber la lumière perpendiculairement sur l'une des parois de la cuve, on n'aperçoit aucune déviation (*).

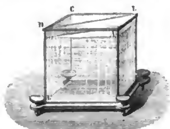


Fig. 563

Enfin nous mettons une dernière expérience sous les yeux du lecteur. Une cuve à base rectangulaire (*fig.* 563) est divisée en deux compartiments par une cloison transversale. Quand on verse de l'eau dans le compartiment ADLL', le rayon entre dans l'eau sans déviation, car il arrive perpendiculairement à la paroi ADL et au liquide qui la baigne; mais en sortant du liquide au point C (*fig.* 564), il est



Fig. 564.

dévié, et, illuminant sur sa route les poussières de l'atmosphère, il montre cette déviation, qui est manifestée aussi parce qu'il atteint un écran en un point R autre que le point D où venait le rayon direct.

1192. **Lois de la réfraction.** — On doit à Descartes la connaissance des lois de la réfraction. Il a établi les relations qui existent entre l'angle d'incidence et l'angle de réfraction, c'est-à-dire entre les angles ICN, RCN' (*fig.* 565) formés par le rayon incident et par le rayon réfracté avec

(*) Quand un faisceau lumineux tel que IC arrive à la surface de séparation de deux milieux, une partie de la lumière se réfracte, comme nous l'expliquons dans ce chapitre, mais il ne faut pas oublier que toujours une autre partie du faisceau incident se réfléchit. Si dans la suite nous ne parlons pas des rayons réfléchis, si nous ne les représentons pas sur les figures, c'est afin de ne pas diviser l'attention, de la fixer tout entière sur le phénomène qui fait l'objet de notre étude.

la normale NN′ menée par le point d'incidence à la surface de séparation des deux milieux. Voici ces lois qui sont fondamentales dans l'étude à laquelle nous allons nous livrer.

1° Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale sont trois lignes droites contenues dans un même plan.

2° Le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant, invariable, toutes les fois que la lumière traverse successivement les deux *mêmes* milieux.

1193. La première loi n'a pas besoin d'explications, elle se comprend d'elle-même. Quant à la seconde, pour concevoir le sens qu'on doit y attacher, considérons un rayon IC (*fig.* 565) tombant sur une surface AB et prenons le plan du papier comme plan d'incidence. Soit le rayon réfracté CR, menons la normale NN′ au point C, et du point C comme centre et avec l'unité de longueur comme rayon, décrivons enfin une circonférence qui rencontre en I, en N, en N′ et en R les deux rayons et la normale. Ces constructions préliminaires étant faites, si l'on abaisse du point I la perpendiculaire IP sur la normale NN′, et du point R, la perpendiculaire RQ sur la même normale, ces perpendiculaires sont ce qu'on appelle les sinus des angles ICN et RCN′.

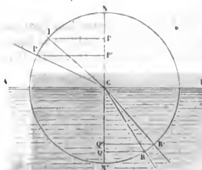


Fig. 565.

La seconde loi de Descartes nous indique que le rapport des longueurs de ces perpendiculaires $\frac{IP}{RQ}$ est un rapport qui reste le même quelle que soit la valeur de l'angle ICN. Par exemple, si le rayon se meut dans l'air et passe ensuite dans l'eau, ce rapport constant est égal à $\frac{4}{3}$. Ainsi

$$\frac{IP}{RQ} = \frac{4}{3}.$$

De même, un autre rayon incident I′C donnerait un rayon réfracté CR′, et l'on aurait

$$\frac{I'P'}{R'Q'} = \frac{4}{3}.$$

Si l'on désigne par i, l'angle d'incidence, par r, l'angle de réfraction, et par n, le rapport constant en question, qui est appelé l'*indice de réfraction*, la seconde loi de Descartes est exprimée d'une manière générale par l'égalité suivante :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

1194. **Démonstration de Descartes.** — On vérifie ces lois au moyen d'un appareil imité de celui qui a été employé par Descartes. AB (*fig.* 566) est la surface horizontale de l'eau contenue dans un vase de verre dont la forme est celle d'un cylindre; KK' est un cercle vertical gradué en degrés à partir de N et de N', qui représentent les deux extrémités du diamètre vertical. Ce cercle a son plan perpendiculaire aux arêtes du cylindre, et son centre se trouve sur la ligne horizontale qui rase la surface AB. I et R sont deux pinnules (*fig.* 566 *bis*) dont les ouvertures se trouvent toujours dans un plan vertical parallèle au plan du cercle gradué, car elles se meuvent à égale distance de ce cercle; elles sont portées par des alidades qui se prolongent jusqu'à des points P et P' tels que CP = CP' = 1.

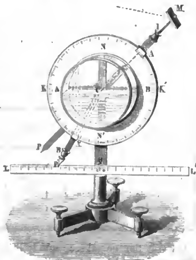


Fig. 566.

Pour faire l'expérience, on fixe la pinnule supérieure en I (*fig.* 566), par exemple, et on dirige dans la chambre noire un trait de lumière solaire qui, passant par l'ouverture I, suive une route IC parallèle au plan du cercle et tombe en un point C centre de la section du cylindre par le plan d'incidence. Le faisceau lumineux se réfracte dans la direction CR.

Comme premier résultat, on constate que le rayon réfracté CR peut passer par l'ouverture de la pinnule R convenablement fixée: cela montre que le rayon réfracté et le rayon incident sont dans un même plan vertical, perpendiculaire à la surface AB de séparation des deux milieux.

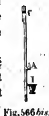


Fig. 566 *bis*.

La vérification de la seconde loi se fait au moyen de la règle divisée LL' qui est horizontale et que l'on peut faire monter ou descendre le long du pied de l'instrument. Selon qu'elle atteint l'extrémité P ou l'extrémité P' de l'une ou de l'autre des alidades, elle donne par une simple lecture ou le sinus de l'angle d'incidence, ou le sinus P'Q' de l'angle de réfraction, comme on le voit dans la figure.

On pourrait objecter à cette expérience, qu'en sortant de l'eau, le rayon

réfracté passe dans le verre, puis du verre dans l'air; mais tous ces passages s'effectuent sans qu'une nouvelle réfraction se produise, car le faisceau lumineux CR est nécessairement perpendiculaire à l'élément de surface qu'il rencontre sur son passage.

1195. **Valeur des indices de réfraction.** — La valeur de l'indice de réfraction dépend des deux substances que la lumière traverse. On appelle indice principal, le rapport des sinus que l'on obtient lorsque la lumière passe du vide dans la substance étudiée. Cet indice n'est pas le même que si la lumière avait d'abord traversé l'air, au lieu de cheminer d'abord dans le vide. Toutefois, pour les corps solides et pour les liquides, la différence est petite. Voici la valeur de quelques indices de réfraction.

SUBSTANCES.	INDICES.	SUBSTANCES.	INDICES.
Eau	1,3358	Flint-glass	1,6405
Alcool.......	1,3740	Sulfure de carbone......	1,6780
Essence de térébenthine.	1,4783	Diamant................	2,7550
Crown-glass............	1,5631	Air...	1,0003

On voit par ce tableau que le diamant est le corps dont l'indice est le plus considérable; mais cet indice n'atteint pas 2,8 : tous les autres sont donc compris entre les étroites limites représentées par les nombres 1 et 2,8.

1196. **Indice inverse de réfraction.** — Au lieu de faire passer la lumière de l'air dans l'eau, si on la fait marcher en sens contraire, c'est-à-dire de l'eau dans l'air; si l'on fait tomber, par exemple, un rayon incident dans la direction de la ligne RC (*fig.* 565), le rayon réfracté parcourt exactement le chemin précédemment suivi par le rayon incident; il prend en émergeant dans l'air la direction CI. Ce résultat peut être ainsi généralisé : quand la lumière rebrousse chemin, elle repasse exactement par la route qu'elle avait suivie dans sa marche directe. Cette loi est exprimée par la formule

$$\frac{\sin I}{\sin R} = \frac{1}{n},$$

dans laquelle I est le nouvel angle d'incidence tel que RCN, et R est l'angle de réfraction ICN correspondant. L'appareil décrit vérifie cette loi. Il suffit de faire arriver le rayon suivant RC; on le voit sortir suivant CI.

1197. **Discussion de la formule.** — La connaissance de l'indice de réfraction d'une substance permet d'évaluer immédiatement l'angle de réfraction qui correspond à tel ou tel angle d'incidence. Une construction

géométrique suffira dans chaque cas, mais il vaut encore mieux recourir aux tables de sinus pour obtenir promptement la solution demandée.

Soit IC (*fig.* 567) tombant à la surface de séparation de l'air et de l'eau sous un angle de 20°. Je trace IP, qui est le sinus de l'angle d'incidence : il s'agit de trouver l'angle de réflexion. Il est donné par la formule :

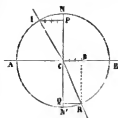


Fig. 567.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{4}{3},$$

d'où l'on tire

$$\sin r = \frac{3}{4} \sin i.$$

Pour avoir r, à partir du point C, je choisis une longueur $CD = \frac{3}{4}$ IP, par le point D, je mène à la normale une parallèle DR, qui rencontre la circonférence en R; CR représente alors le rayon réfléchi. En effet, abaissons le sinus RQ, nous aurons $RQ = CD = \frac{3}{4}$ IP, ou bien $\frac{IP}{RQ} = \frac{4}{3}$.

Avec des tables de sinus, l'opération serait plus simple : on chercherait le sinus de 20°, on prendrait les $\frac{3}{4}$ de la valeur trouvée; on aurait le sinus de l'angle de réfraction, et la table même donnerait ensuite l'angle de réfraction. En réalité, les tables donnent les logarithmes ; mais il importe peu ; en principe les opérations à faire restent les mêmes.

Les figures 568 et 569 montrent la marche de la lumière qui passe de

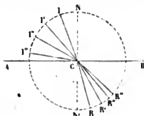


Fig. 568.

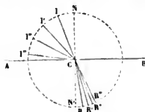


Fig. 569.

l'air, soit dans l'eau, soit dans le diamant. Elles sont construites pour les angles d'incidence de 20°, 40°, 80°. Au rayon IC correspond le rayon réfracté CR, à I'C le rayon réfracté CR', et ainsi de suite. L'angle de réfraction est toujours plus petit que l'angle d'incidence, puisque n est plus grand que l'unité. Il est bon de remarquer que les angles d'incidence croissent dans toute la série des valeurs plus rapidement que les angles de réfraction.

1198. **Angle limite.** — Que l'on continue à faire grandir l'angle d'incidence au delà de 80°, l'angle de réfraction augmentera aussi, mais sera toujours plus petit que l'angle d'incidence. L'angle d'incidence, en augmentant toujours, ne peut pas dépasser cependant 90°, dont le sinus est égal à 1. Donc l'angle de réfraction ne peut pas dépasser une certaine valeur plus petite que 90° qui représente ce qu'on a appelé l'*angle limite*, et dont le sinus est, s'il s'agit du passage de la lumière de l'air dans l'eau, les $\frac{3}{4}$ du sinus de l'angle d'incidence, c'est-à-dire les $\frac{3}{4}$ de l'unité. En recourant aux tables de logarithmes, on reconnaît que dans ce cas particulier l'angle limite a pour valeur 48° 35'. Par une construction géométrique on peut arriver à la même valeur (*fig.* 570); s'il s'agissait de l'air et du verre, l'angle limite serait égal à 42°.

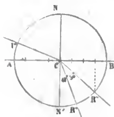


Fig. 570.

L'angle limite représentant la valeur de l'angle de réfraction pour laquelle sin i est le plus grand possible, c'est-à-dire égal à l'unité, on aura généralement la grandeur de cet angle par la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, dans laquelle sin i devra être remplacé par 1. D'où $\frac{1}{\sin r} = n$, ou bien $\sin r = \frac{1}{n}$.

L'angle limite est donc toujours tel que son sinus est l'inverse de l'indice de réfraction.

1199. **Phénomènes qui dépendent de l'angle limite.** — Un plongeur qui fixe ses regards vers la surface de l'eau qui est au-dessus de sa tête, voit par réfraction le tableau déformé des objets extérieurs qui se trouve comme ramassé dans un petit espace. Ce tableau est compris tout entier dans le cône droit dont l'axe est la verticale OP (*fig.* 571), et dont la génératrice OC_1 fait un angle de 48° 35' avec cet axe. Suivant cette ligne OC_1, arrivent les rayons qui ont rasé la surface, c'est-à-dire ceux qui viennent des objets situés à l'horizon ; et ceux-là sont évidemment les derniers rayons qui peuvent pénétrer dans le liquide. Toute

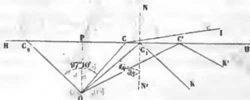


Fig. 571.

la surface de l'eau, en dehors du cône C_1OC_2 est comme opaque pour le plongeur ainsi placé. De là, une conséquence curieuse, c'est que si l'intervalle C_1C_2 était couvert, aucun rayon lumineux provenant de l'extérieur ne parviendrait à l'observateur.

1200. **Réflexion totale.** — Si nous examinons la marche inverse de la lumière, c'est-à-dire si nous supposons qu'elle chemine de l'eau dans l'air, ou du verre dans l'air, la connaissance de l'angle limite nous conduit à des résultats très-importants. Ainsi, le rayon incident AB (*fig.* 568) qui tombe successivement suivant RC, R'C, R"C, R'"C se réfracte dans les directions CI, CI', CI", CI'"; mais si l'on continue à faire croître l'angle que fait le rayon incident avec la normale, l'angle de réfraction grandira, et quand l'angle d'incidence sera devenu égal à ce que nous avons appelé l'angle limite R"CN' (*fig.* 570), le rayon réfracté rasera la surface, en théorie du moins. Mais lorsque l'angle d'incidence dépassera l'angle limite, que deviendra l'angle de réfraction? La formule n'a plus de sens. Car elle exigerait que sin *i* fût plus grand que l'unité, ce qui est impossible; il faut donc recourir à l'expérience directe pour savoir ce qui aura lieu.

On trouve que dans ces conditions il n'y a plus de faisceaux lumineux émergents, un rayon tel que $R^{iv}C$ ne traverse plus la surface AB, il se réfléchit sur cette surface et la réflexion a lieu avec un éclat remarquable. Le rayon réfléchi est tellement brillant, que le miroir le plus poli ne produit pas une réflexion aussi intense. La réflexion est dite totale.

1201. **Prisme à réflexion totale.** — La réflexion totale est employée très-fréquemment en physique. L'angle qui lui correspond se détermine comme l'angle limite; on le calcule par la formule $\sin i = \frac{1}{n}$ qui, appliquée au verre, donne en moyenne un angle de 42°. Cette valeur permet d'employer les prismes de verre, comme des appareils réfléchissants, qui remplacent avec beaucoup d'avantage les miroirs ordinaires, dans un grand nombre d'expériences d'optique. Le prisme à réflexion totale est un prisme droit dont la base est un triangle rectangle isocèle. La figure 572 représente une coupe ABC du prisme par un plan perpendiculaire aux arêtes. Sur l'une des faces de l'angle droit AB, on fait arriver un rayon perpendiculaire à cette face, ce rayon E'F passe sans déviation suivant FG et frappe BC en faisant avec la normale un angle dont la valeur (45°) est su-

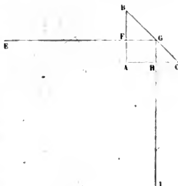


Fig. 572.

périeure à celle de l'angle limite. La réflexion totale aura donc lieu, et le rayon réfléchi GI, tombant perpendiculairement sur AB, émergera dans l'air sans éprouver aucune déviation nouvelle. Tout se passera donc comme si le rayon incident avait été courbé à angle droit.

1202. **Divers phénomènes. Réfraction atmosphérique.** — La théorie, qui vient d'être donnée, explique de suite les phénomènes les plus simples de la réfraction, une pièce de monnaie dont le bord est en P envoie, nous l'avons constaté (1191), des rayons tels que PC, qui se brisent en C et arrivent en suivant la direction CO. On explique de même ce fait bien connu de la rame qui paraît brisée à l'endroit où elle pénètre dans l'eau.

Mais parmi les faits qui dépendent de la réfraction, il en est un très-important en astronomie, c'est celui de la réfraction atmosphérique. Elle a pour effet de faire apparaître les astres en des positions autres que celles qu'ils occupent réellement. Les astronomes l'ont connue depuis les temps les plus anciens : Ptolémée, qui vivait dans le deuxième siècle de notre ère, avait même commencé une excellente étude du phénomène, dans l'espérance de corriger les erreurs qu'il apportait aux observations. Nos connaissances actuelles rendent facile l'examen de l'influence générale qu'elle exerce.

Soit en effet T la terre (*fig.* 573), soit AB la direction de la lumière qui vient d'une étoile. Ce rayon marche d'abord dans le vide, à son entrée dans l'atmosphère il se réfracte et se rapproche de la normale NN' ; et comme les couches d'air sont d'autant plus denses qu'elles sont plus voisines de la surface du sol, on a une série continue de réfractions qui écartent toujours le rayon dans le même sens, et lui font suivre une ligne courbe. L'effet produit est tel que l'astre paraît au spectateur placé en B' dans la direction B'A' ; il semble dans le ciel plus haut qu'il ne l'est en réalité. Cet effet est d'autant plus prononcé que l'astre est plus près de l'horizon, il diminue dans le voisinage du zénith.

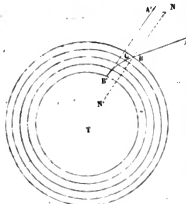


Fig. 573.

Jusqu'à présent, aucun moyen de correction d'une précision satisfaisante ne permet de rectifier les résultats, et les hauteurs des astres, quand elles sont déterminées dans les régions éloignées du zénith, sont toujours affectées d'erreurs impossibles à corriger.

Pour donner une idée nette de la valeur de la réfraction atmosphérique, nous dirons que le soleil apparaît tout entier au-dessus de l'horizon, alors qu'en réalité il est entièrement au-dessous. Ce n'est qu'au moment où son bord inférieur paraît à nos yeux que son bord supérieur atteint réellement le plan de l'horizon.

1203. **Mirage.** — Le phénomène de la réflexion totale rend compte d'un effet singulier que l'on observe surtout dans les plaines arides échauffées par le soleil, et qu'on désigne sous le nom de *mirage*. Dans l'expédition d'Égypte, nos soldats en ont été souvent témoins. Voici comment Monge le décrit :

« Dès que la surface du sol est suffisamment échauffée par la présence « du soleil, et jusqu'à ce que vers le soir, elle commence à se refroidir, le « terrain ne paraît plus avoir la même extension, et il paraît terminé, à une « lieue environ, par une inondation générale. Les villages qui sont placés « au delà de cette distance paraissent comme des îles situées au milieu « d'un grand lac, et dont on serait séparé par une étendue d'eau plus ou « moins considérable. Sous chacun des villages on voit son image renver- « sée, telle qu'on la verrait effectivement s'il y avait une surface d'eau « réfléchissante; seulement, comme cette image est à une assez grande « distance, les petits détails échappent à la vue, et l'on ne voit distincte- « ment que les masses; d'ailleurs, les bords de l'image renversée sont un « peu incertains, et tels qu'ils seraient dans le cas d'une eau réfléchissante, « si la surface de l'eau était un peu agitée.

« A mesure que l'on approche d'un village qui paraît placé dans l'inon- « dation, le bord de l'eau apparente s'éloigne; le bras de mer qui sem- « blait vous séparer du village se rétrécit il disparaît enfin entièrement, « et le phénomène qui cesse pour ce village, se reproduit sur-le-champ « pour un nouveau village que vous découvrez derrière, à une distance « convenable.

« Ainsi, tout concourt à compléter une illusion qui quelquefois est « cruelle, surtout dans le désert, parce qu'elle vous présente vainement « l'image de l'eau dans le temps même où vous en éprouvez le plus grand « besoin. »

1204. **Explication de Monge.** — Monge expliqua le phénomène par la distribution des couches d'air voisines du sol. Au contact du sable qui est brûlant, l'air s'échauffe, monte, et laisse la place à une nouvelle couche qui s'échauffe et monte à son tour. Mais, malgré ces mouvements, qui tendent à rétablir l'équilibre normal, il n'en est pas moins vrai qu'à un moment donné, les couches les plus chaudes, et par suite les moins denses, sont toujours les plus voisines du sol. Ces couches inférieures se comportent alors comme un milieu moins réfringent, placé au-dessous d'un milieu plus réfringent.

Cela posé, indiquons les couches successives de l'atmosphère par les horizontales placées sur la figure. Soit A (*fig.* 574), le sommet d'un arbre. Un rayon AB, qui émane de A, arrive en B à la surface de séparation de deux couches d'air ; il se réfracte, s'écarte de la normale et suit une direction

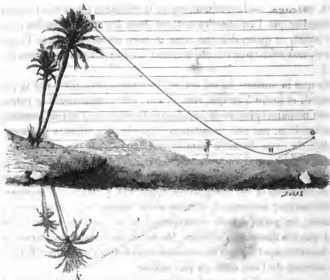


Fig. 574.

telle que BC. Un écart semblable par rapport à la normale se reproduit à chaque nouvelle surface de séparation. Mais le phénomène continuant dans le même sens, et l'angle d'incidence grandissant toujours, le rayon peut arriver en H à la surface de séparation de deux couches sous un angle qui soit précisément égal à l'angle limite. Dès lors la réfraction n'a plus lieu ; la réflexion totale se produit et le rayon se réfléchit de H vers O. Il arrive à l'œil de l'observateur dans une direction telle que l'image du point A paraît en A'. D'ailleurs des rayons directs, qui ont suivi une autre route, arrivant à l'œil sans avoir subi une réfraction très-grande, on apercevra l'objet en A, et son image en A', comme si la réflexion avait eu lieu dans un miroir plan.

1205. Mais le mirage s'observe alors même qu'aucun objet ne s'élève à la surface du sol. Dans les déserts de l'Afrique, une nappe d'eau apparait souvent dans le lointain produisant une illusion complète. Monge a fait voir qu'alors le phénomène était dû à la lumière bleue, qui illumine les couches supérieures de l'atmosphère et qui se réfléchit comme celles

qui proviennent de tout objet élevé au-dessus de la surface du sol. Le spectateur est trompé et croit à l'existence d'une nappe d'eau, parce qu'en réalité, nous reconnaissons la présence l'eau dans le lointain, par la lumière du ciel qu'elle réfléchit. Nous avons voulu, par la figure 575, appeler l'attention



Fig. 575

sur ce phénomène de mirage, qui est l'un des plus fréquents au désert (*).

1204. **Passage de la lumière à travers une lame à faces parallèles.** — Tout rayon de lumière EF (*fig.* 576), qui traverse une lame à faces AB et CD parallèles entre elles, donne un rayon émergent GH qui est parallèle au rayon incident. C'est un résultat que tout le monde connaît; il n'est personne qui n'ait remarqué qu'à travers une vitre plane et partout également épaisse, les objets extérieurs paraissent à leur place, comme si la vitre n'était pas interposée. Cependant, à l'entrée et à la sortie du verre, les rayons lumineux ont dû se réfracter ; mais les deux réfractions produisent des effets inverses qui se détruisent. En effet, le rayon incident EF tombant sur la face AB, se brise et donne le rayon réfracté FG dont on déterminera la direction en appliquant la loi de Descartes. La normale MM', menée en G à la face CD, est parallèle à la première normale NN' : d'où il suit que l'angle d'incidence MGF est égal à l'angle GFN' du premier rayon réfracté. Réciproquement (1196), l'angle de réfraction HGM' devra être égal au premier angle d'incidence NFG : le rayon GH doit donc sortir parallèlement à EF.

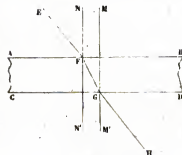


Fig. 576

(*) Le mirage ne fait une illusion complète que si l'on n'est pas familiarisé avec ses effets. L'Arabe, même dans une région du désert qu'il ne connaît pas, distingue, sans hésiter, l'eau vraie de l'eau apparente. Quand une nappe d'eau existe réellement, le terrain humide qui la borde, prend une teinte foncée qui est tout à fait caractéristique.

1205. **Effets des prismes.** — Dans la figure précédente, supposons que la face CD, en tournant autour d'une ligne passant par le point G, reste perpendiculaire au plan du papier et prenne la position C'D' (*fig.* 577). Le milieu réfringent terminé par la face AB et par la nouvelle face C'D' constitue ce qu'on appelle un *prisme*, c'est-à-dire un milieu terminé par deux faces non parallèles. En même temps que C'D' a tourné autour de G, la normale MM' a été déviée de la même quantité angulaire; elle a pris la position PP', et l'angle d'incidence FGM s'est augmenté de toute la quantité dont la normale a tourné. Il faut donc que l'angle d'émergence change en même temps. Par suite, le rayon sortant du prisme ne peut pas rester dans la direction GH, il doit prendre une direction telle que GH', et dès lors il ne peut plus être parallèle au rayon incident. L'effet du prisme a été de produire une déviation angulaire du rayon émergent par rapport au rayon incident; et, par cette déviation, le rayon lumineux est éloigné du sommet de l'angle que font entre elles les deux faces.

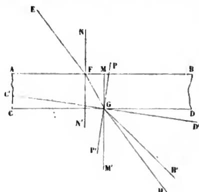


Fig. 577.

Si l'on fait tourner la face C'D' en sens inverse, et que D' aille vers B, la normale tournera également; l'angle d'incidence diminuera; l'angle d'émergence devra donc diminuer aussi; le rayon, à sa sortie du prisme, suivra une direction nouvelle, et le rayon émergent s'écartera du sommet de l'angle que font les deux faces entre elles plus que si ces faces étaient parallèles. Pour une inclinaison suffisante de la face C'D', la normale PP' changera de côté par rapport à FG, mais la déviation du rayon GH n'en sera que plus considérable.

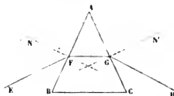


Fig. 578.

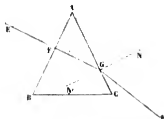


Fig. 579.

Les figures 578 et 579, ainsi que la figure 580, montrent que toujours la

déviation du rayon lumineux due à l'interposition d'un prisme écarte toujours la lumière du sommet de l'angle A que forment, en se rencontrant, les deux faces AB, AC. Les deux dernières figures ont été tracées de telle manière que l'un des rayons fût perpendiculaire à l'une des faces; nous avons voulu montrer par là que, sous certaines conditions, les faces AB, CD pouvaient ne pas dévier toutes deux à la fois la lumière qui traverse le prisme.

1206. Les prismes que l'on emploie dans les expériences d'optique ont, en général, la forme d'un prisme droit P à base triangulaire, tel que le représente la figure 581. En général aussi, les expériences sont tellement disposées que le rayon incident EF soit dans un plan perpendiculaire aux arêtes latérales du prisme, et tous les phénomènes de réfraction ont lieu dès lors dans ce plan; les expériences ont, de cette manière, une plus grande netteté. Ce sont les conditions que nous avons supposées dans les cas traités précédemment (*).

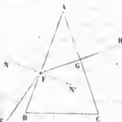
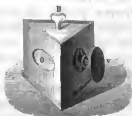


Fig. 580.

Fig. 581.

Quand on veut employer des prismes liquides, on se sert de flacons semblables à celui de la figure 582, dans lesquels on introduit du liquide ; à travers les lames de verre qui limitent le prisme en O et en O', on peut faire passer un rayon de lumière qui est forcé de cheminer par l'intermédiaire de la masse liquide.



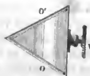


Fig. 582.

(*) L'angle que fait le rayon incident avec le rayon émergent, ou angle de déviation, a une valeur qui, pour un prisme donné, dépend de celle de l'angle d'incidence. L'expérience et le calcul montrent que, dans tous les cas, cet angle de déviation est susceptible d'acquérir une valeur minimum qui se produit quand les angles d'incidence et d'émergence deviennent égaux.

CHAPITRE IV.

LENTILLES.

1207. De toutes les formes que peuvent affecter les surfaces qui limitent les milieux réfringents, il en est qui leur donnent la propriété de dévier les rayons dans des directions telles, qu'il se produit des images agrandies ou diminuées, des objets en présence ; habituellement, les surfaces choisies sont sphériques. Les milieux réfringents, dans ces conditions, représentent les pièces essentielles qui composent les instruments d'optique, et à ce point de vue ils ont une grande importance. N'auraient-ils pas cette utilité, que les phénomènes intéressants qu'ils produisent suffiraient pour justifier l'étude attentive que nous allons en faire.

1208. **Définition des lentilles.** — Les corps réfringents, limités par des surfaces sphériques, s'appellent des lentilles. Il y a autant d'espèces de lentilles que de dispositions possibles de deux surfaces pareilles. On peut donner à l'une et à l'autre tel rayon de courbure que l'on désire ; on peut même prendre, égal à l'infini, le rayon de l'une des surfaces : ce qui revient à la remplacer par un plan.

Malgré les formes diverses qu'elles affectent, toutes les lentilles ont été classées en deux groupes, et cette classification est fondée sur la considération des deux effets optiques qu'elles exercent. Le premier groupe comprend toutes celles qui jouissent de la propriété de provoquer la convergence des rayons, qui allaient en s'écartant les uns des autres. On les appelle à cause de cela *lentilles convergentes*. Par leurs formes elles présentent un caractère commun : elles sont plus épaisses au milieu que vers les bords. Les figures 583, 584, 585, représentent la coupe de quelques-unes d'entre elles. La lentille de la figure 583 est dite *biconvexe ;* celle de la figure 584, *plan-convexe*, et la dernière (*fig.* 585), qui est concave-convexe, se nomme *ménisque convergent*. Les lentilles du second groupe sont plus minces au milieu qu'aux bords : on les nomme *lentilles divergentes*, car elles augmentent la divergence des rayons. Les figures ci-jointes représentent les coupes de plusieurs de ces lentilles. On



Fig. 583. Fig. 584. Fig. 585.

voit, dans la figure 586, une lentille *biconcave;* dans la figure 587, une lentille *plan-concave*, et dans la figure 588, une lentille *concave-convexe* ou *ménisque divergent*.



Fig. 586. Fig. 587. Fig. 588.

LENTILLES CONVERGENTES.

1209. **Axe principal.** — Soient C et C', (*fig.* 589) les centres des deux sphères qui limitent la lentille LL'; soit XX' une ligne droite, indéfinie, qui passe par ces deux points; cette ligne, par rapport à laquelle la lentille est évidemment symétrique, est appelée *l'axe principal*. Ce sont les phénomènes relatifs à cet axe principal qui vont nous occuper d'abord.

1210. **Marche des rayons dans une lentille.** — Un point lumineux P (*fig.* 589) est situé sur l'axe principal, quelle route suivront les rayons qui,

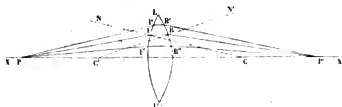


Fig. 589.

émanés de ce point, viennent traverser la lentille? Il est aisé, au moyen de la loi de Descartes, d'en tracer la marche. Soit un rayon PI qui rencontre la lentille au point I. La ligne, qui joint le point I au centre C de la surface, est la normale CN au point d'incidence. L'angle d'incidence PIN est connu, par suite son sinus l'est aussi; et après avoir calculé le sinus de l'angle de réfraction, au moyen de la loi de Descartes, on obtient l'angle de réfraction lui-même, et par suite on construit le rayon réfracté IR. Ce rayon tombe sur la seconde surface. On mène au point R la normale C'N', et l'on construit l'angle d'émergence, comme il vient d'être dit; RP' représente le rayon émergent. Pour chaque rayon PI', PI", une construction semblable donnera la direction des différents rayons qui sortent de la lentille.

L'ensemble des résultats obtenus par ces constructions géométriques peut être compris dans une formule algébrique, dont l'avantage est de contenir en elle, l'expression de tous les phénomènes qui s'y trouvent comme enveloppés. Mais, d'une part, la construction géométrique est lente et peu précise; de l'autre, le calcul exact nécessite des formules assez compli-

quées ; nous préférons recourir à l'expérience, comme l'ont fait d'ailleurs ceux qui ont découvert les phénomènes qui vont être décrits. Comme méthode de démonstration d'ailleurs, la méthode expérimentale se rapporte beaucoup mieux à l'esprit dans lequel cet ouvrage a été conçu.

1211. Foyer principal. — L'expérience prouve que tous les rayons AI, A'I', etc. (*fig.* 590), qui arrivent sur une lentille en marchant parallèlement

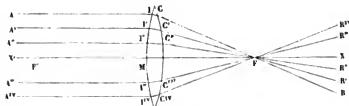


Fig. 590.

à l'axe principal, viennent, après la réfraction, se rencontrer tous sensiblement en un même point de cet axe ; ce point F est appelé *foyer principal*.

Pour démontrer ce fait, on se sert du procédé déjà employé pour les miroirs concaves (1172). La première opération, que l'on exécute, consiste à marquer l'axe principal : on fait arriver dans la chambre noire un rayon très-délié de lumière solaire X'X qui soit horizontal, et on dispose la lentille dans une position telle qu'elle soit rencontrée, au milieu M de sa face antérieure, par ce rayon tombant perpendiculaire au plan de jonction des deux calottes sphériques. Le rayon lumineux traverse alors la lentille normalement aux deux faces, s'écarte sans déviation, et trace, pour ainsi dire, par le chemin qu'il parcourt, la direction de l'axe principal.

Fait-on arriver des rayons solaires parallèlement à cet axe, par de petites ouvertures percées au volet de la chambre, et voisines de celle qui a laissé s'introduire le rayon marquant l'axe? on voit les rayons AI, A'I', etc., frapper la lentille, suivre, après les deux réfractions, les routes CR, C'R', et finalement, passer tous par le point F. La marche de ces rayons est accusée, dans la chambre noire, par l'illumination des poussières qui flottent dans l'air, comme nous l'avons déjà indiqué dans l'étude de la réflexion de la lumière.

Au lieu de faire arriver les rayons un à un, on peut découvrir tout d'un coup une large ouverture et introduire un faisceau qui couvre toute la lentille. Ce faisceau, quand il émerge, forme un cône de rayons convergeant au point F ; puis, divergeant ensuite à partir de ce point.

Que la lentille soit retournée face pour face, et l'on trouvera un autre foyer principal F'. Les deux foyers F et F' sont, d'ailleurs, à égale distance de la lentille. Dorénavant, nous aurons le soin d'indiquer la posi-

tion de ces deux foyers, toutes les fois que nous dessinerons une lentille.

1212. **Foyers conjugués.** — Des expériences semblables aux précédentes démontrent que tous les rayons partis d'un même point situé sur l'axe principal, donnent des rayons émergents qui se rencontrent tous, en un même point, situé sur cet axe et au delà du foyer principal.

Dans la chambre noire, on introduit un large faisceau de lumière solaire que l'on concentre en un point P (*fig.* 589) au moyen d'une première lentille, derrière laquelle se trouve un écran percé d'ouvertures. Des rayons solaires sont introduits de telle sorte que l'un d'eux suive l'axe principal et en indique la direction; l'œil, qui suit la route des autres rayons, voit qu'après les réfractions, ils rencontrent l'axe en P'. Le point P' est appelé *foyer conjugué* du point P. Ces deux points P et P' sont unis dans un tel rapport l'un à l'autre, que si un point lumineux était placé en P', les rayons partis de ce point iraient après réflexion converger en P. Cela résulte de ce qui a été dit plus haut sur la lumière qui rebrousse chemin (1196); elle suit toujours, dans sa marche inverse, la route par laquelle elle était venue d'abord.

1213. **Axes secondaires.** — L'axe principal n'est pas la seule ligne suivant laquelle la lumière peut traverser une lentille sans subir de déviation. Toutes les fois qu'un rayon lumineux traverse la lentille en passant par deux éléments de surface M et M' (*fig.* 591), parallèles entre eux, il émerge parallèlement à son incidence (cela a été démontré (1204) dans l'étude des lames à faces parallèles); en un mot, dans ce cas particulier, le rayon lumineux IM'MR qui traverse la lentille reprend, à la sortie, sa direction première. De plus, si l'épaisseur de la lentille n'est pas très-grande, les rayons IM' et MR peuvent être considérés comme situés sur le prolongement l'un de l'autre. On admettra aussi sans erreur sensible que la direction d'une ligne X_1X_1' très-voisine de IM' et de MR pourra être prise pour la route commune suivie par ces deux rayons; X_1X_1' s'appelle un *axe secondaire*. Parmi toutes les lignes que l'on pourrait choisir, on préfère celle qui passe par le point O où le rayon MM' rencontre l'axe principal XX' de la lentille. La raison de cette préférence tient à ce que ce point O, qu'on nomme le

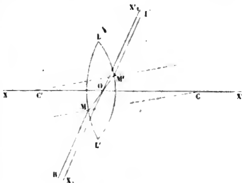


Fig. 591.

centre optique de la lentille, est le même quelle que soit la direction du rayon non dévié; c'est donc un point qui appartient à tous les axes secondaires.

En effet, puisque les éléments de surface M et M' sont parallèles, leurs normales MC et M'C' le sont aussi : donc, les deux triangles MCO et M'C'O ont leurs angles égaux et sont semblables ; on a, par suite : $\frac{CO}{C'O} = \frac{MC}{M'C'}$; ce qui veut dire que le point O partage la distance des centres, qui est constante, en deux parties proportionnelles aux rayons des surfaces sphériques; or cela est vrai, aussi bien pour le rayon lumineux passant par M et M' que pour tout autre rayon passant par deux éléments parallèles quelconques; car notre raisonnement a été indépendant de la position donnée aux deux éléments de surface.

1214. Voici les différentes positions du centre optique : 1° pour une lentille biconvexe le point O est dans l'intérieur de la lentille; 2° pour une lentille plan-convexe, il est au point où l'axe coupe la surface convexe. C'est en ce point en effet que la face convexe est parallèle à la face plane : 3° pour un ménisque convergent, le point O est hors de la lentille, derrière la partie convexe : l'axe secondaire n'est pas compris entre les deux rayons incidents et émergents, comme il l'était dans le cas de la figure 591 ; mais, avec les lentilles que l'on emploie, il en est peu distant.

Par un point situé hors de l'axe, il passe toujours un axe secondaire : car si la ligne MM' se relève graduellement, le rayon incident qui lui correspond se relève aussi en prenant successivement toutes les inclinaisons possibles.

1215. **Foyers des axes secondaires.** — L'expérience donne exactement les mêmes résultats, qu'il s'agisse d'un point lumineux situé sur l'axe principal ou sur un axe secondaire. Un rayon lumineux qui rencontre obliquement la lentille vers son milieu, et qui passe sans déviation, marque

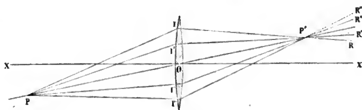


Fig. 592.

un axe secondaire. Et les rayons émanés d'un point P (*fig.* 592), situé sur l'axe secondaire, viennent, après leur passage à travers la lentille, se rencontrer tous en un même point P' de cet axe. La figure représente la marche des rayons telle qu'elle apparaîtrait dans l'obscurité de la chambre noire.

Fait-on arriver des rayons parallèles à l'axe secondaire? Ces rayons, après leur émergence, convergent sur cet axe en un même point qui est un foyer principal. Chaque axe secondaire a deux foyers principaux, tous deux placés à une distance du centre optique égale sensiblement à celle qui en sépare les mêmes foyers sur l'axe principal.

1216. Image d'un objet. — Un dernier mot encore, et la construction qui donne l'image d'un objet AB sera facilement comprise. Devant la lentille O, dont les deux foyers principaux se trouvent en F et F_1, est placé l'objet AB (*fig.* 593). Pour trouver l'image de cet objet, cherchons



Fig. 593.

d'abord l'image du point A. Dans ce but on commence par mener l'axe secondaire AO qui passe par le point dont il s'agit; sur cet axe, doivent converger, après leur émergence, tous les rayons qui sont émanés de A, et c'est précisément à leur rencontre que se trouve l'image cherchée. Or il est un rayon dont la marche est facile à tracer : c'est celui qui tombe sur la lentille, en suivant une route AI parallèle à l'axe principal. Après sa sortie (*), il passe, nous le savons, au foyer principal F qui est le foyer des rayons incidents parallèles à XX'. En continuant sa marche, il rencontre l'axe secondaire au point A'; et, comme les rayons partis de A doivent tous couper l'axe secondaire au même point, leur point de concours sera nécessairement A'. L'œil, s'il est placé dans la direction des rayons qui s'y croisent, voit le point A' comme s'il était un point lumineux, et si un écran se trouve en A', sa surface sera éclairée en ce point. Donc A' est l'image de A. On obtiendra de même l'image du point B en B', et aussi l'image des points intermédiaires. L'image A'B' est déterminée; elle est toujours renversée comme l'indique la construction que nous venons de

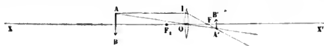


Fig. 594.

faire. La position et la grandeur de l'image changent d'ailleurs, selon la distance de l'objet à la lentille. Les figures 593, 594. 595, 596, montrent

(*) Ce rayon entre dans la lentille par le point I qui peut être pris pour le point d'émergence, parce que l'épaisseur de la lentille est, le plus souvent, très-petite et négligeable.

ce qui arrive alors. Voici les résultats les plus importants : quand l'objet est très-loin, l'image est très-près du foyer principal et très-petite (*fig.* 593).

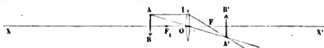


Fig. 595.

A mesure que l'objet s'approche, l'image grandit (*fig.* 593, 594, 595 et 596) ; quand l'objet est au double de la distance focale de la lentille,

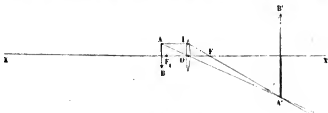


Fig. 596.

l'image est à la même distance, et sa grandeur est celle de l'objet (*fig.* 595) : l'objet s'approchant toujours, l'image devient plus grande, et lorsque l'objet est très-près du foyer principal, l'image en est très-éloignée et considérablement amplifiée (*fig.* 596).

1216 *bis*. **Image virtuelle.** — Jusqu'ici, l'objet n'a pas dépassé F_1 ; allons plus loin : supposons qu'il soit placé entre F_1 et la lentille (*fig.* 597). La construction faite, le rayon IF ne rencontre pas AX_1 ; car dans le trapèze AIFO, on a : AI < FO. Mais, les prolongements de ces deux lignes AX_1 et IF se rencontrent en A', et tout se passera pour l'œil qui reçoit les rayons émergents comme s'ils émanaient de A' : ce qui donnera A'B' pour image droite virtuelle et agrandie de AB. Il en est ainsi en réalité : car l'œil, placé devant la lentille, et recevant les rayons réfractés, voit parfaitement cette image. Plus tard, nous insisterons sur ce sujet.

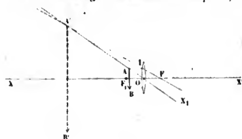


Fig. 597.

1217. **Formule.** — Une formule générale donne, avec une approximation suffisante, les relations qui existent entre l'image et l'objet. D'abord,

pour ce qui concerne leurs distances à la lentille, on déduit de la similitude des deux triangles AIA′, OFA′ (*fig.* 594) l'égalité :

$$\frac{AA'}{AI} = \frac{OA'}{OF};$$

et comme AI est approximativement égal à AO, car l'axe secondaire AOA′ est peu incliné par rapport à l'axe principal (cette dernière condition que nous supposons ici réalisée, l'est le plus souvent quand on se sert de lentilles pour obtenir l'image des objets), nous pourrons considérer AI comme égal à la distance p de l'objet à la lentille. Les mêmes raisons permettent d'écrire $OA' = p'$, ou la distance de l'image à la lentille. Posons enfin $OF = f$, et la formule devient

$$\frac{p+p'}{p} = \frac{p'}{f},$$

et en divisant par p'

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (a).$$

Cette formule exprime la relation entre la distance du point lumineux et celle de son image au centre optique, relation qui existe, que ce point se trouve placé sur l'axe secondaire ou sur l'axe principal ; elle n'est qu'approchée il est vrai ; mais les vérifications expérimentales, que l'on en a faites, montrent qu'elle peut être employée dans des limites assez étendues.

La même construction fournit les relations de grandeur de l'image et de l'objet. En effet, les deux triangles AOB, A′OB′ sont semblables, et de là on tire :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}.$$

1218. **Discussion de la formule.** — La formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, dans laquelle f peut être obtenu par une détermination préalable, donne la valeur de p' correspondant à une valeur quelconque de p ; on a $p' = \frac{pf}{p-f}$. Tâchons de déduire, de cette égalité, la loi que suivent les changements de position des foyers conjugués, quand la distance du point lumineux à la lentille, d'abord infiniment grande, diminue progressivement, en passant par toutes les valeurs. Ne nous arrêtons pas sur les cas particuliers, sauf dans les circonstances où l'un d'eux permettrait d'établir quelques divisions saillantes qui partagent, en groupes bien caractérisés, l'ensemble de tous les résultats possibles : c'est ce que l'on appelle discuter la formule.

Le point lumineux est-il à l'infini, ou bien p est-il infini ? L'équation mise sous la forme $p' = \frac{f}{1-\frac{f}{p}}$ montre que dans ce cas $p' = f$. C'est un

résultat auquel il fallait s'attendre : dire que le point lumineux est à l'infini, c'est dire que les rayons qui partent de ce point arrivent comme un faisceau de lignes parallèles sur la lentille.

Le point lumineux se rapproche-t-il de la lentille? p diminue, $\frac{f}{p}$ grandit, $1-\frac{f}{p}$ diminue, et par suite p' augmente. Donc, si le point lumineux se rapproche de la lentille, le foyer conjugué va au contraire en s'en éloignant. La valeur de p diminuant toujours, supposons que l'on ait : $p=2f$, la formule devient alors :

$$p'=\frac{f}{1-\frac{f}{2f}}=2f$$

Dans ce cas, le point lumineux et le foyer conjugué sont tous deux à égale distance de la lentille. Ces résultats montrent clairement que si le point lumineux s'avance et parcourt une immense étendue, depuis l'infini jusqu'à la distance de $2f$, le foyer conjugué ne se déplace que d'une petite longueur, depuis la distance f jusqu'à la distance $2f$.

Le point lumineux s'approche-t-il encore, mais seulement depuis $p=2f$ jusqu'à $p=f$, p' continue à croître, $\frac{1}{p}$ prend les valeurs que nous avions trouvées jusqu'ici pour $\frac{1}{p'}$; et, à cause de la symétrie que présente la formule $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$, $\frac{1}{p'}$ devra prendre réciproquement toutes les valeurs qu'avait précédemment $\frac{1}{p}$. Ainsi, quand le point lumineux avancera depuis la distance $2f$ jusqu'à la distance f, le foyer conjugué ira depuis la distance $2f$ jusqu'à l'infini. A un faible déplacement du point lumineux, correspondra un déplacement considérable de son foyer conjugué.

1219. **Foyers virtuels.** — Jusqu'ici, le point lumineux ne s'est approché de la lentille que jusqu'à la distance f. Supposons maintenant qu'il dépasse le foyer principal, p devient plus petit que f; alors la valeur de p' dans l'égalité $p'=\frac{f}{1-\frac{f}{p}}$ devient négative, puisque $\frac{f}{p}$ est plus grand que 1.

L'interprétation de ce résultat négatif est celle que l'on donne toujours aux valeurs négatives, quand elles se présentent, à propos d'un problème de géométrie. La distance du foyer conjugué à la lentille doit être comptée en sens inverse de la direction suivant laquelle elle était comptée jusque-là. En physique, nous devons dire que les rayons partis d'un point situé entre le foyer principal et le centre optique doivent, après leur passage à travers la lentille, se rencontrer du côté où se trouve le point lumineux lui-même.

Or, cela n'est évidemment possible, que pour les prolongements de ces rayons; la valeur négative donne donc la position d'un foyer virtuel : c'est d'ailleurs ce que l'expérience vérifie parfaitement. L'œil placé sur le trajet des rayons émergents subit la même impression que s'ils émanaient d'un point situé sur l'axe du même côté de la lentille que le point lumineux.

1220. **Grandeur des images.** — La grandeur relative de l'image et de l'objet est déterminée par l'égalité, $\frac{I}{\Omega} = \frac{p'}{p}$ en appelant I la grandeur de l'image, et Ω la grandeur de l'objet. La formule (*a*) (1217) donne le rapport de p' à p pour toutes les positions de l'objet. Donc, il sera possible, avec son aide, de déterminer, dans tous les cas, la valeur du rapport $\frac{I}{\Omega}$.

Les résultats du calcul s'accordent parfaitement avec ceux de la construction géométrique, et ils ont l'avantage d'être plus précis, ainsi que nous l'avons déjà dit dans des circonstances analogues.

1221. **Vérification expérimentale.** — La vérification expérimentale est aisée à obtenir. Dans la chambre noire on présente une bougie AB

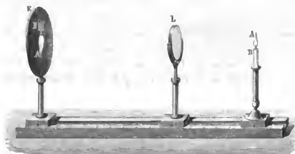


Fig. 598.

(*fig.* 598) devant une lentille L ; la bougie est d'abord placée très-loin. Sur un écran E que l'on avance ou que l'on recule, on finit par obtenir, à la suite de quelques tâtonnements, l'image nette de la bougie. Cette image est très-petite, renversée et très-près du foyer principal. La bougie avance-t-elle ? son image recule; la bougie est-elle au double de la distance focale principale ? l'image est à la même distance et de la même dimension que l'objet. On continue à avancer, l'image s'éloigne, elle devient plus grande que l'objet, comme notre figure le représente, et bientôt elle devient si grande et si éloignée qu'on ne peut plus l'atteindre. Quand l'objet a dépassé la distance focale, l'image ne peut plus se former sur l'écran, elle paraît droite et grossie pour l'œil qui la regarde à travers la lentille.

1222. **Mégascope.** — Voici une autre forme de l'expérience précédente,

mais une forme qui offre plus d'intérêt. Au volet de la chambre noire est enchâssée une lentille ; on dispose extérieurement sur un fond noir un petit bas-relief que l'on éclaire vivement. en accumulant sur lui une grande quantité de lumière, à l'aide de miroirs convenablement disposés. Une image se forme dans l'intérieur de la chambre, image que l'on reçoit sur un écran placé à la distance où elle paraît parfaitement nette. Le bas-relief fixé à un support, mobile sur des roulettes, est avancé ou reculé progressivement. D'abord, il est porté assez loin de la lentille à une distance plus grande que $2f$, l'image du bas-relief apparaît plus petite que l'objet. On le rapproche, l'image grandit et recule, et l'on obtient facilement, de cette manière, un grossissement de 10, 20, 30 fois le diamètre du bas-relief. L'image, apparaissant très-brillante dans l'obscurité de la chambre noire, donne au spectateur une illusion complète. C'est une intéressante application de la théorie des lentilles. L'appareil qui la réalise s'appelle le *mégascope*, il a été inventé par Charles, physicien français.

1223. **Microscope solaire.** — Le mégascope est un instrument, qui sert à produire l'image agrandie des objets, dont les dimensions sont déjà notables. On a utilisé les effets des lentilles, pour obtenir l'image agrandie, plusieurs centaines de fois, des objets extrêmement petits, dont l'œil ne pourrait pas observer les détails. L'instrument qui remplit ce but et dans lequel l'objet qu'on veut grossir se trouve éclairé soit par la lumière du soleil, soit par la lumière électrique, est nommé microscope solaire. Il se compose d'une lentille à court foyer L (*fig.* 599), devant laquelle l'objet

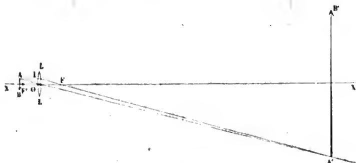


Fig. 599.

microscopique se place un peu au delà du foyer principal. On reçoit l'image agrandie sur un écran. La lentille doit être à court foyer, afin qu'il soit possible de réaliser la condition principale que doit remplir le microscope.

Un exemple fera concevoir la nécessité d'une faible distance focale de la lentille employée. Veut-on grossir un objet 1000 fois ? il faut que son image

soit à une distance de la lentille égale à 1 000 fois celle qui sépare l'objet du verre convergent (1220) ; et comme cet objet doit se trouver au delà du foyer, son image sera distante de l'appareil d'au moins 1 000 fois la distance focale. Si donc cette dernière était seulement d'un décimètre, l'image devrait se trouver à 100 mètres, il n'y aurait pas de chambre noire, qui permît d'observer avec un tel instrument. Si la distance focale était de 1 centimètre, une chambre noire de 10 mètres suffirait; en réalité, la distance focale est toujours plus petite que 1 centimètre.

La lentille destinée à donner le grossissement, quelle que soit son importance, ne constitue pas cependant à elle seule le microscope solaire. Ici, encore plus que dans le mégascope, l'objet a besoin d'être considérablement éclairé. Les rayons émanés de chacune de ses parties viennent couvrir une vaste surface sur l'écran; il faut donc que l'éclat de l'objet soit de beaucoup supérieur à celui des corps qui sont éclairés par la plus vive lumière solaire pour que son image apparaisse avec une netteté suffisante.

C'est dans le but d'éclairer vivement l'objet, que les deux lentilles O et F (*fig.* 600) font partie du microscope solaire. La lentille O est très-large, elle reçoit les rayons solaires envoyés parallèlement à l'axe de l'instrument. La seconde lentille F concentre en un petit espace tous les rayons déjà rendus convergents par la première, et c'est au point où la concentration de la lumière est maximum que l'on place l'objet. Toutes les pièces sont portées par un tube métallique formé de tuyaux qui s'emboîtent les uns dans les autres. A la suite du porte-objet P, vient le microscope proprement dit, formé par la lentille L que soutient une monture métallique. Lorsque l'objet intercalé entre des lames de verre est placé, par tâtonnement, dans la position voulue, on obtient, avec un système de crémaillère, l'ajustement de la lentille L dont la position dépend de celle de l'écran tenu généralement à poste fixe.

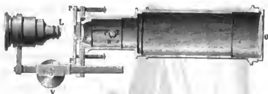


Fig. 600.

1224. Chambre noire. — A la chambre noire qu'il avait inventée et qui a été décrite, Porta ajouta un perfectionnement important au moyen duquel les images pâles et un peu vagues des objets extérieurs devenaient nettes et brillantes. Il lui suffit pour arriver à ce résultat d'adapter une lentille au volet, qui n'est plus percé d'un petit trou, mais bien d'une ouverture assez grande pour qu'une lentille assez large puisse y être enchâs-

sée. Il est inutile d'insister sur la théorie; seulement nous dirons que l'image n'a des dimensions un peu considérables que dans le cas où la distance focale de la lentille est grande. Cela résulte des formules qui ont été données.

Nous avons en effet obtenu $\frac{I}{O} = \frac{p'}{p}$; en remplaçant p' par sa valeur $\frac{pf}{p-f}$, on a $\frac{I}{O} = \frac{f}{p-f} = \frac{1}{\frac{p}{f}-1}$. Or on voit de suite, en considérant le second membre de cette égalité, que si f augmente, $\frac{1}{\frac{p}{f}-1}$ augmente aussi : donc le rapport $\frac{I}{O}$ devient plus grand quand la distance focale de la lentille est elle-même plus considérable.

La chambre noire a servi aux dessinateurs pour la reproduction des monuments ou des paysages.

1225. Souvent, on projette directement les images sur la feuille de papier et le dessinateur n'a qu'à suivre leurs contours. Dans ce but, un prisme à réflexion totale est placé vers la partie supérieure d'un tuyau soutenu par trois pieds. Une toile noire (*fig.* 601) forme comme une petite tente, au-dessous de laquelle se place le dessinateur afin que la lumière extérieure ne l'empêche pas de distinguer nettement l'image projetée sur l'écran. Cet écran consiste en une feuille de papier posée sur une table mobile qu'on peut faire monter ou descendre pour la mettre au point. Les rayons qui traversent le prisme se réfléchissent et viennent dessiner l'image sur la feuille de papier. Une lentille convergente devant le prisme serait nécessaire pour donner de la netteté aux images, mais on évite des pertes de lumière en faisant servir le prisme, à la fois de lentille et de miroir. La face antérieure du prisme est convexe, la face inférieure est concave de manière que cette pièce représente un ménisque convergent, en même temps que la face hypoténuse joue le rôle de miroir.

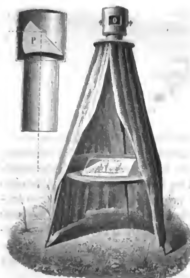


Fig. 601.

On comprend du reste très-aisément comment l'image de l'objet AB, qui se formerait en A'B' dans la chambre noire, est renvoyée en A''B''. La

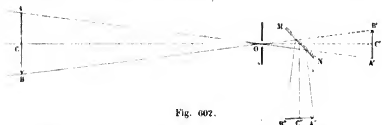


Fig. 602.

figure 602 montre la marche des rayons qui se réfléchissent sur le miroir MN, comme ils le font sur la face hypoténuse du prisme à réflexion totale.

LENTILLES DIVERGENTES.

1226. Les lentilles divergentes ont la propriété, nous l'avons dit, de provoquer un écart des rayons qui tombent sur leur surface ; elles augmentent la divergence de ceux qui vont en s'éloignant déjà les uns des autres, elles diminuent la convergence de ceux qui concourent vers le même point. Elles doivent cette propriété à leur forme, qui est celle d'un solide terminé par deux surfaces sphériques, telles que l'épaisseur est moindre au milieu que sur les bords. LL' (*fig.* 603) est le profil de l'une d'elles, celui de la lentille biconcave que nous représenterons de préférence. Son axe principal XX est une ligne passant par les centres des deux surfaces sphériques qui limitent la lentille.

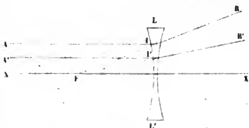


Fig 603.

1227. **Foyer principal.** — Lorsque des rayons AI, A'I' (*fig.* 603), parallèles à l'axe principal, frappent la lentille, ils divergent après avoir traversé le milieu réfringent. Tous s'écartent comme s'ils partaient d'un même point F situé du côté de la lentille par lequel arrivent ces rayons parallèles. Ce point est dit le foyer principal. Entre ce foyer principal et celui des lentilles convergentes, il est une différence capitale dont il importe de bien se pénétrer, sans quoi l'on tombe dans les erreurs les plus graves. Cette différence consiste en ce que le foyer principal d'une lentille diver-

gente est un foyer virtuel, où ne viennent pas en réalité se rencontrer les rayons; mais c'est le point où concourent les prolongements géométriques des rayons émergents. Il en est de même des rayons parallèles à tout axe secondaire : ils ont un foyer virtuel placé à la même distance de la lentille que le foyer principal.

1228. L'expérience se réalise dans la chambre noire, en plaçant une lentille divergente (*fig.* 604) sur le trajet d'un faisceau de rayons solaires

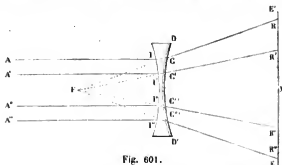


Fig. 601.

parallèles. A une certaine distance, on fixe un écran EE', et on couvre la lentille d'un disque opaque DD', qui est percé de petites ouvertures C,C',C''. Parmi les rayons qui composent le faisceau émergent, ceux qui rencontrent les ouvertures sont les seuls qui puissent trouver passage, et sur l'écran on peut aisément marquer les points R, R', R'', etc., où viennent aboutir ces rayons. Lorsque la lentille est enlevée sans que l'on ait touché ni au disque DD' ni à l'écran EE', il est facile de vérifier que les lignes droites RC, R'C', R''C'', etc., menées du centre de ces petites images au centre des ouvertures, se rencontrent en un même point F placé derrière la lentille. Quelle que soit la direction des faisceaux, on reconnaît que l'un d'eux passe sans déviation, c'est celui qui correspond à l'axe principal.

Le plus souvent, pour démontrer cette divergence, on se contente de placer l'œil sur la route des rayons CR, C'R', qui viennent de traverser la lentille; la sensation produite est la même que s'ils émanaient d'un point lumineux tel que F; on en conclut que les rayons divergent comme s'ils partaient de ce point.

1229. **Foyers conjugués.** — Une lentille divergente est-elle placée sur le trajet d'un cône de rayons lumineux PI, PI' qui partent d'un même point P (*fig.* 605), et qui la traversent à l'émergence, la direction des faisceaux de lumière CR, C'R' est telle qu'ils forment un nouveau cône plus ouvert que le premier et dont le sommet P' est du même côté que le point lumineux et en même temps plus rapproché de la lentille que ne l'est ce dernier point. En un mot, à tout point lumineux P placé sur

l'axe principal correspond un foyer conjugué virtuel P' situé sur la même

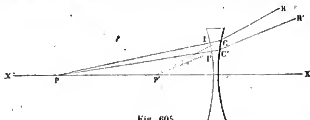


Fig. 605.

ligne. La démonstration expérimentale se fait par les méthodes déjà données (1228).

1230. Centre optique. Axes secondaires. — Tout ce que nous avons dit sur le centre optique des lentilles convergentes (1213) s'applique presque sans modification aux lentilles divergentes, aussi bien que ce qui a rapport aux axes secondaires. Ainsi. il y a deux foyers principaux, mais virtuels, pour chaque axe secondaire, tous deux également distants du centre optique, et tout point lumineux situé sur un axe secondaire donne une image virtuelle située sur ce même axe.

1231. Tracé géométrique des images. — Les deux expériences qui précèdent suffisent pour la détermination des images des objets. Soit AB (*fig.* 606), un objet placé devant une lentille, l'image du point A se

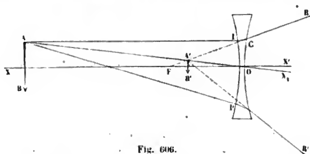


Fig. 606.

trouvera sur l'axe secondaire AOX_1, qui le rencontre. On obtiendra le point où cette image se produit par le tracé du rayon AI, parallèle à l'axe principal : ce rayon émerge en suivant la direction IR, qui est telle que, prolongée, elle passe par le foyer principal F de la lentille (*). Mais la figure montre aussi que ce rayon prolongé rencontre nécessairement l'axe secon-

(*) Cela suppose que le point I, où se fait l'incidence, se confond sensiblement avec le point C par lequel a lieu l'émergence : ce qui s'approche assez de la vérité, car la lentille est en général peu épaisse relativement à sa distance focale.

daire en A'. Or nous savons (1230) que le prolongement de tous les rayons sortant de la lentille doit rencontrer l'axe secondaire en un même point : A' représentera donc l'image virtuelle de A ; l'œil, placé sur le trajet des rayons émergents, verra le point lumineux en A'. Il en sera de même de l'image B' du point B et de l'image de tous les autres points de l'objet.

Cette construction montre que l'image A'B' est droite et plus voisine de la lentille que l'objet AB, et nécessairement plus petite que cet objet, car elle est parallèle à AB et située dans le même angle AOB, et comme plus voisine que l'objet du sommet de l'angle, elle doit être plus petite que lui. En répétant la construction, on reconnaîtrait que l'image grandit à mesure que l'objet s'approche.

1232. **Formule.** — Reprenons la figure 606, et nous obtiendrons aisément les relations de position de l'image et de l'objet. Cette figure en effet nous montre que les triangles AIA' et OFA' sont semblables ; donc, leurs côtés homologues sont proportionnels, et l'on aura

$$\frac{AA'}{AI} = \frac{A'O}{OF},$$

et si l'on appelle p la distance de l'objet au centre optique O de la lentille, p' la distance de l'image au même point O, et enfin, si la distance focale OF est représentée par f; si de plus, on admet, ce qui est à peu près exact, $AO = p$ et $A'O = p'$, la formule devient $\frac{p - p'}{p} = \frac{p'}{f}$, ou bien

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

Cette formule est facile à discuter.

La grandeur de l'image est donnée par la même relation qui nous a déjà servi dans le cas des lentilles convergentes :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}.$$

On l'établit en partant de la similitude des deux triangles AOB, A'OB'.

1233. **Image d'un objet virtuel.** — Parmi les divers cas qui peuvent se présenter, il en est un qui doit plus spécialement fixer notre attention : c'est le cas où l'objet est virtuel. Des rayons viennent converger par exemple au point A' (*fig.* 607), par l'emploi d'un système optique quelconque, tel qu'une lentille convergente LL' ; un autre faisceau convergent arrive en B' ; en un mot, un ensemble de rayons donnent par la réunion de leurs points de croisement l'image A'B'. Sur le trajet de ces rayons et avant que les rencontres n'aient lieu, une lentille divergente est interposée, quel sera l'effet produit ? Le cas où le foyer F de cette lentille se trouve compris entre A'B' et la lentille est le plus important, il nous

occupera de préférence. L'analogie nous conduit à appliquer la construction déjà employée. Nous dirons : En premier lieu, l'image du point lumineux doit se trouver sur l'axe secondaire A'O, passant par ce point A'. Secondement, parmi tous les rayons qui convergeaient vers A' avant que la lentille LL ne fût interposée, il en était un, le rayon HI, qui, cheminant parallèlement à l'axe, continuait sa route suivant IA'. Ce rayon, après avoir traversé la lentille, donnera un rayon réfracté IR qui, prolongé, viendra passer en F_1. Mais ce rayon, si l'on continue à suivre sa direction, rencontre l'axe secondaire A'O au point A″. C'est donc en A″ que tous les prolongements des rayons qui aboutissaient en A' rencontreront l'axe secondaire. L'œil verra en A″ l'image virtuelle formée par le prolongement

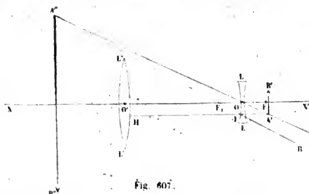


Fig. 607.

des rayons émergents; il verra également en B″ l'image du point B'. En définitive, A″B″ est l'image virtuelle et renversée de A'B'.

L'image n'est virtuelle que parce que OF, ou son égal OF_1, est plus petit que A'I ; c'est à cause de cela que les côtés IF_1 et A'O du trapèze F_1OA'I se sont rencontrés du côté indiqué par la figure.

CHAPITRE V

SPECTRE SOLAIRE

DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE

1234. **Expérience du spectre solaire.** — La déviation, que subit un rayon de lumière solaire en traversant un prisme, est accompagnée d'un

autre phénomène, qui, dans l'obscurité de la chambre noire, présente aux yeux l'une des plus belles expériences de la physique. Sur un écran placé à distance (*fig.* 608), les rayons émergeant du prisme, forment une image brillamment colorée : c'est le spectre solaire. Sept couleurs principales le composent : le *violet*, l'*indigo*, le *bleu*, le *vert*, le *jaune*, l'*orangé*, le *rouge*; elles sont disposées sur sept bandes parallèles qui s'harmonisent en passant de l'une à l'autre par des nuances insensibles.

L'image spectrale est toujours limitée par deux côtés rectilignes perpendiculaires à la direction des bandes; aux extrémités des bandes extrêmes



Fig. 608.

elles sont terminées en demi-cercle si l'ouverture de la chambre noire est ronde, ou bien en ligne droite si cette ouverture est une fente longue, étroite et parallèle aux arêtes du prisme.

Si, après avoir examiné le spectre solaire en lui-même, on cherche ensuite à déterminer la position qu'il occupe, on reconnaît que l'axe qui le traverse en allant du rouge au violet a une direction perpendiculaire aux arêtes du prisme, c'est-à-dire qu'il se trouve dans le plan de réfraction, et par conséquent les diverses couleurs se succèdent sur l'écran en s'éloignant inégalement du point qu'aurait atteint le faisceau solaire si le milieu réfringent n'avait pas été interposé : le rouge est le moins dévié, puis l'orangé, et ainsi de suite, jusqu'au violet qui se trouve toujours, plus que toute autre couleur, écarté de l'arête de réfringence que nous avons appelée A au § 1205.

1235. **Théorie de Newton.** — Newton a expliqué le phénomène, et a prouvé la vérité de son explication par un grand nombre d'expériences très-ingénieuses. Il a démontré que la lumière blanche du soleil est formée par la réunion d'un grand nombre de rayons de diverses couleurs, possédant des réfrangibilités inégales. Ces rayons, quand ils cheminent réu-

nis, nous donnent la sensation de la couleur blanche; mais comme ils possèdent chacun un indice de réfraction spécial, ils sont déviés inégalement en traversant un prisme et cessent dès lors d'être parallèles; c'est pour cette raison qu'ils atteignent, en des points différents, l'écran placé derrière le prisme. L'expérience, que nous venons de rapporter, n'est donc qu'une analyse de la lumière, ainsi que Newton l'a affirmé le premier.

Les expériences de Newton peuvent être distribuées en deux groupes : dans les unes, il prouva clairement que les différentes couleurs sont inégalement réfrangibles ; dans les autres, il fit une synthèse des rayons diversement colorés, et il établit que les sept couleurs du spectre, quand elles sont réunies, reconstituent la lumière blanche.

1236. **1° Expérience des deux bandes.** — Sur un fond noir deux bandes étroites I (*fig.* 609), l'une bleue, l'autre rouge, sont collées l'une à la suite



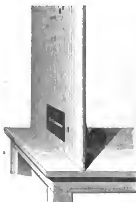


Fig. 609.

de l'autre. Nous les supposerons horizontales, comme cela est sur la figure. A travers un prisme P dont les arêtes sont aussi horizontales, ces bandes apparaissent toutes deux déplacées parallèlement à leur position primitive ; elles sont vues en I'. Mais elles sont déplacées inégalement; on reconnait que toujours la plus déviée est la bande bleue : il faut donc admettre que les rayons bleus sont plus réfrangibles que les rayons rouges. Pour se rendre un compte plus exact du phénomène et reconnaître pourquoi les bandes paraissent relevées, il suffit de considérer le prisme ABC (*fig.* 610), dont l'angle A des faces, traversées par la lumière, est en

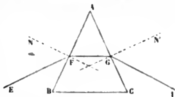


Fig. 610.

haut. Un rayon IG qui tombe sur ce prisme émerge suivant FE; l'œil placé en E verra la lumière venir dans la direction FE et rapportera le point lumineux à une position qui se trouve sur le prolongement de cette direction EF.

Mais cette expérience faite avec des matières recouvertes de couleurs artificielles et non avec les rayons du spectre solaire même, ne peut conduire à des conséquences rigoureuses. Dans les expériences suivantes, Newton agit directement sur les rayons qui forment le spectre.

1237. 2° Étude successive des divers rayons colorés. — Un premier écran, qui reçoit le spectre solaire, est percé d'une ouverture par laquelle les rayons rouges seuls peuvent passer (*fig.* 611). La lumière rouge che-



Fig. 611.

mine, arrive sur un second écran placé à distance et le frappe en un point P que l'on a soin de marquer. Ces opérations préliminaires effectuées, on dispose derrière le premier écran un prisme réfringent maintenu dans une position invariable. Le rayon rouge traverse ce prisme, est dévié et vient en un point R éloigné de P. On fait alors tourner le premier prisme, celui qui détermine la formation du spectre, jusqu'à ce que le rayon violet qui s'en échappe passe par l'ouverture et suive exactement a route que suivait d'abord le rayon rouge. La lumière violette traverse le second prisme, elle est déviée et vient en un point V. L'expérience montre que ce point V se trouve plus loin de P que ne l'était le point R dont on avait marqué la position.

Pour s'assurer que le rayon violet est bien tombé sur le second prisme en suivant la même route que le rayon rouge, on retire ce prisme auxiliaire, et si l'expérience est bien faite, on doit voir le rayon violet rencontrer le point P du second écran.

Les différents rayons colorés, autres que le violet, étant substitués successivement au rayon rouge, on trouve que leur ordre de réfran-

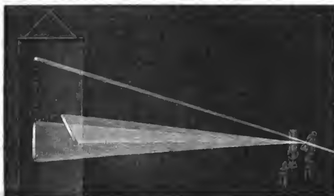
gibilité est bien celui qui est indiqué par leur distribution dans le spectre solaire.

1238. **3° Expérience des prismes croisés.** — Les expériences successives qui viennent d'être exécutées sont reproduites simultanément, en adoptant une autre disposition. Un spectre vertical RV (*fig.* 612 et 613) produit par un prisme dont l'arête de réfringence est horizontale, est reçu sur un écran éloigné. L'observateur marque les positions occupées par les diverses couleurs, puis entre ce premier prisme et l'écran il interpose un second prisme dont les arêtes sont verticales. Le spectre, déplacé par cette interposition, est rejeté de côté en R'V', et ne conserve plus sa verticalité primitive ; le rouge est moins écarté de sa position antérieure que le violet. Toutes les autres couleurs ont subi des déviations intermédiaires.



Fig. 612.

Les figures 612 et 613 représentent cette expérience telle que nous venons de la décrire ; mais les dispositions prises ont été telles, qu'une partie seulement du rayon direct est interceptée par le premier prisme, et que les rayons qui forment le premier spectre ne sont pas tous


Fig. 613.

interceptés par le second prisme. Par ces dispositions, on aperçoit simultanément le faisceau direct, qui est blanc, le faisceau dispersé par le premier prisme, qui offre les différentes couleurs du spectre, et enfin on voit ces couleurs simples elles-mêmes inégalement déviées par le second prisme.

1239. **4° Une lentille dévie inégalement les divers rayons colorés.**

— Au lieu d'un prisme, que l'on se serve d'une lentille, et il sera possible de constater, comme dans les précédentes expériences, les réfrangibilités inégales des rayons colorés du spectre. Si les rayons violets sont plus réfrangibles que les rayons rouges, un objet, placé au delà du foyer d'une lentille convergente et qui sera éclairé par la lumière violette, devra former son image réelle plus près de la lentille que si l'éclairement était produit par la lumière rouge.

Voici l'expérience de Newton, qui s'exécute dans la chambre noire.

Sur une page imprimée d'un livre I (*fig.* 614), on fait tomber l'une des

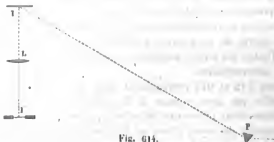


Fig. 614.

couleurs du spectre solaire, le rouge par exemple. Devant le livre, on dispose une lentille convergente L, et en arrière de celle-ci un écran de papier huilé I'; par un déplacement convenable de cet écran, on obtient aisément une image très-distincte des caractères d'imprimerie; ce résultat obtenu, on fixe l'écran dans sa position actuelle. Puis, en tournant le prisme qui fournit le spectre, on éclaire la même page en bleu, aussitôt l'œil placé derrière l'écran huilé ne voit plus les caractères distincts. Mais si l'on fait avancer l'écran vers la lentille, on atteint une position nouvelle où la netteté des caractères reparaît. Il est démontré par cela que les rayons bleus divergents sont plus énergiquement ramenés à la convergence que les rayons rouges. C'est une nouvelle preuve de leur plus grande réfrangibilité.

1240. Cette inégale réfrangibilité se manifeste aussi dans l'expérience, qui consiste à rassembler les rayons solaires au moyen d'une lentille convergente. Les rayons violets forment leur foyer en F_1 (*fig.* 615), les rayons rouges en F_2, et la différence des deux foyers s'accuse par les irisations qui apparaissent lorsque la lumière émergente est reçue sur un écran. L'écran est-il placé entre la lentille et les foyers, elle est entourée d'un cercle rouge formé par des rayons rouges qui n'ont pas pu se réunir avec d'autres; est-il reculé au delà des foyers, le bord du cercle éclairé est bleu-violet.

1241. **5° Preuve par la réflexion totale.** — De l'étude, que nous avons

faite de la réflexion totale, il est résulté que l'angle limite pour lequel cette réflexion peut déjà se manifester est d'autant plus grand que l'indice de

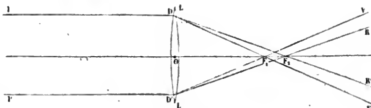


Fig. 615.

réfraction du rayon lumineux est plus petit. Car, le sinus de l'angle limite étant égal à $\frac{1}{n}$, si n diminue, la valeur de cet angle augmente. Par l'observation des angles de réflexion totale qui correspondent aux différents rayons colorés, il est donc possible de s'assurer des différences de réfrangibilité. C'est ce qui a conduit Newton à l'expérience suivante : sur un prisme isocèle ABC (*fig.* 616), et dont l'angle A est droit, on fait tomber

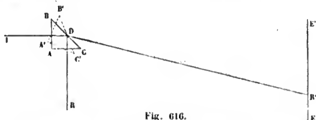


Fig. 616.

perpendiculairement à la face AB un rayon solaire qui frappe la face BC et se réfléchit totalement ; ce résultat a déjà été signalé plus haut ; mais si, en tournant lentement le prisme, on lui donne une certaine position A'B'C' qui rende l'angle d'incidence du faisceau sur la face BC de plus en plus petit, la lumière incidente traversera le prisme, et le spectre apparaîtra peu à peu sur l'écran EE'. En opérant ainsi, on voit se montrer, successivement, par voie de transmission, les différentes couleurs, le rouge, puis l'orangé, le jaune, le vert, etc., enfin le violet apparaît le dernier, et dès lors le spectre est complet. L'apparition tardive du violet dans le spectre montre que les rayons violets sont encore réfléchis totalement sous un angle plus petit que celui qui convient à la réflexion totale des autres rayons : ce qui prouve que les rayons violets sont les plus réfrangibles, puis viennent l'indigo, le bleu, enfin le rouge qui, traversant le premier suivant DR' la surface de séparation du verre et de l'air, manifeste par cela même qu'il possède le plus petit indice de réfraction.

RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

1242. Newton, après avoir opéré, dans les expériences que nous venons de décrire, une analyse de la lumière solaire, a complété la démonstration en réalisant la synthèse ou la recomposition de la lumière blanche. Ces nouvelles expériences ajoutées aux précédentes doivent apporter la conviction dans tous les esprits : elles prouvent que la théorie des phénomènes, que nous étudions, est bien connue, et cela, sans qu'il y ait aucune lacune dans leur explication, puisque l'expérimentateur est capable de reconstituer le sujet de son analyse en se servant des éléments qu'il avait d'abord séparés.

1243. **1° Première expérience.** — Newton prit des poudres de diverses couleurs, et après des essais répétés il parvint à composer un mélange qui semblait d'un blanc parfait. « J'en étendis une couche assez épaisse sur le « plancher de ma chambre, là où le soleil donnait ; et, à l'ombre, je plaçai « un morceau de papier blanc. A une distance de dix-huit pieds, cette « composition me parut d'un blanc éclatant qui surpassait celui du pa- « pier. Un de mes amis, qui n'était pas prévenu, après les avoir examinés, « me répondit que les deux objets, que je lui désignais, lui paraissaient « également blancs. »

On répète cette expérience dans les cours, au moyen d'un carton partagé en sept secteurs, que l'on colore avec sept couleurs pareilles à celles du spectre solaire, et, leur donnant à peu près l'étendue relative qu'elles présentent dans le spectre ; on imprime au carton un mouvement de rotation rapide autour d'un axe qui est perpendiculaire à son plan et qui passe par son centre. Par suite de la vitesse du mouvement, l'impression, produite par chaque couleur sur l'œil qui regarde, persiste pendant tout le temps que les autres couleurs mettent à venir la remplacer. Toutes les couleurs sont donc vues à la fois en tous les points de la surface qui paraît alors d'un gris blanchâtre ; elle est d'un blanc plus ou moins parfait, selon l'exactitude avec laquelle les couleurs du spectre ont été rendues. En général, la teinte tend vers le gris ou vers le jaune.

1244. **2° Recomposition de la lumière blanche par une lentille convergente.** — L'expérience du carton tournant n'est pas faite avec les couleurs véritables du spectre : ce qui suffit pour expliquer la petite coloration qui subsiste. Il est évident que l'expérience ne peut être tout à fait concluante, qu'en se servant des rayons mêmes du spectre : il faut en disposer pour éclairer par chacun d'eux tous les points d'une même surface. Newton a réussi au moyen d'une lentille convergente. Un spectre produit par un prisme est reçu sur cette lentille. Les rayons diversement

colorés sont alors réfractés par elle et viennent former leur foyer à peu près tous en un même point; les rayons violets un peu plus près de la lentille, les rayons rouges un peu plus loin : mais, quoique différents, les foyers sont voisins et les faisceaux qui viennent y aboutir s'entre-croisent dans un certain espace où les couleurs s'entremêlent; ils forment sur un écran convenablement placé un champ qui paraît d'une parfaite blancheur..

Cette expérience permet de reproduire, mais avec une grande perfection, le résultat déjà obtenu avec le carton tournant : il suffit d'employer, comme le faisait Newton, un instrument en forme de peigne qui, placé près de la lentille, entre elle et le prisme, intercepte une ou plusieurs espèces des rayons du spectre qui vont la rencontrer; le champ éclairé se colore aussitôt et prend la teinte qui résulte du mélange des couleurs restantes. En déplaçant lentement le peigne, la coloration du champ varie pour chaque déplacement, et la succession des couleurs devient très-distincte; mais, par un mouvement très-rapide du peigne, le champ paraît d'une blancheur parfaite.

1245. **3° Expérience des prismes opposés.** — Newton a recomposé la lumière blanche par un grand nombre d'autres moyens; nous nous bornerons à ajouter aux expériences qui précèdent celle des prismes opposés.

Sur le trajet des rayons qui ont traversé déjà un prisme et qui donnent un spectre solaire, Newton place un second prisme identique au premier, dont l'arête de réfringence A' est parallèle à celle A du premier, mais disposée en sens inverse, comme le montre la figure 617. Les rayons déviés par le premier prisme, sont déviés en sens inverse par le second, et

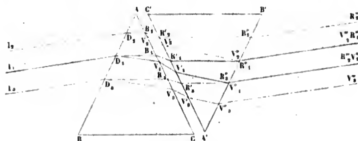


Fig 617.

comme les déviations inverses sont exactement de la même grandeur, les rayons du faisceau primitif sont ramenés au parallélisme. Dès lors on ne trouve plus le spectre solaire; les rayons, qui le formaient, ont été réunis et donnent désormais de la lumière blanche.

Si l'on étudie le phénomène de très-près, on reconnaît que les rayons tels

que I_4D_4 donnent des rayons émergents $R''_4R'''_4$ et $V''_4V'''_4$ qui sont parallèles, il est vrai, mais qui ne se superposent pas. Les rayons $R''_4R'''_4$ et $V''_4V'''_4$ ne peuvent pas se rassembler pour former de la lumière blanche, et il semble qu'après la réfraction un spectre doit apparaître encore ; mais un faisceau de rayons incidents n'est jamais réduit à une ligne géométrique. Au-dessus de I_1D_1 est un rayon I_2D_2, au-dessous est un rayon I_3D_3, et le rayon violet émergent produit par I_2D_2 se superpose au rayon rouge donné par I_1D_1, le rayon rouge venant de I_3D_3 au rayon violet de I_1D_1, et ainsi là recomposition a lieu entre les rayons colorés qui ne suivaient pas primitivement la même route. Cependant le bord supérieur de l'image blanche est coloré en rouge orangé, et son bord inférieur en bleu violet. Car les rayons extrêmes n'ont pu se recombiner avec aucun autre.

1246. **Homogénéité des couleurs du spectre.** — Lorsque l'on considère la succession des couleurs du spectre et que l'on observe par quelles nuances insensibles elles se fondent les unes dans les autres, une pensée ne peut manquer de venir à l'esprit ; c'est que les couleurs qui forment les teintes de transition ne sont autres que le produit du mélange des deux couleurs franches dont elles sont les limites. Ainsi, entre le jaune et le bleu du spectre apparaît le vert, et nous savons tous qu'en mêlant du bleu et du jaune l'on peut obtenir du vert : il y a plus, en voyant une couleur verte, l'œil croit le plus souvent y reconnaître une teinte bleue et une teinte jaune ; il y a donc lieu de penser que, dans le spectre, le vert n'est qu'un mélange des deux couleurs voisines qui empiètent l'une sur l'autre. Il n'en est rien cependant : si l'on répète l'expérience de Newton et que l'on fasse passer une de ces couleurs limites du spectre à travers un ou plusieurs prismes successifs, comme dans l'expérience du § 1237, jamais le vert ne se décompose en jaune et en bleu ; jamais l'orangé ne s'est divisé en rouge et en jaune. Les couleurs du spectre sont indécomposables.

Ce n'est pas qu'on ne puisse obtenir, avec des rayons jaunes et bleus réunis, une couleur verte toute semblable à celle qui se montre dans le spectre solaire. Newton le faisait en interceptant toutes les couleurs d'un spectre qui recouvraient une lentille convergente (1244), toutes, sauf deux, celles que l'on voulait combiner, et au foyer une image verte apparaissait. Mais si l'on regardait cette image à travers un prisme, comme dans l'expérience des deux bandes (1236), elle se divisait en deux autres, inégalement déviées, qui faisaient voir les deux couleurs qu'on avait mélangées. Regarde-t-on, au contraire, par le même procédé, le vert du spectre, il est dévié, mais il ne se divise pas.

1247. **Couleurs des corps.** — Examinons de même une bande colorée par les matières colorantes artificielles, et reprenons, par exemple, l'expérience des deux bandes (1236) : regardons ainsi une étoffe, un papier, les pétales d'une fleur ou l'aile d'un papillon, nous reconnaîtrons qu'au-

cune des couleurs que ces objets présentent n'est simple : toutes sont décomposables par le prisme.

Lorsque la lumière blanche vient à frapper un objet, les rayons diffusés dans tous les sens ne sont jamais de même espèce. Chaque matière colorante exerce son action spéciale sur la lumière incidente, absorbe certains rayons, en renvoie d'autres, et c'est de l'ensemble des rayons ainsi renvoyés que dépend la couleur des corps. Si ces rayons étaient dans les proportions où ils se trouvent dans la lumière solaire, l'objet paraîtrait blanc : tel est le cas d'une feuille de papier.

RAIES DU SPECTRE.

1248. **Diverses espèces de rayons.** — D'après les impressions produites par la lumière qui colore le spectre, les rayons solaires ont été classés, comme nous le savons, en sept groupes qui ont reçu leurs noms de la teinte qui les caractérisait. Toutefois, de ce que l'œil ne distingue que sept couleurs dans le spectre, il ne faut pas en conclure qu'il n'y a en réalité que sept espèces de rayons de lumière, que toute la bande rouge par exemple est formée par des rayons absolument identiques. Il n'en est rien : une bande colorée choisie dans une région quelconque de l'image est formée par plusieurs rayons qu'on ne saurait confondre, car ils se distinguent les uns des autres par les valeurs différentes de leurs indices de réfraction.

Pour nous en convaincre, imaginons un faisceau de rayons parallèles II' (*fig.* 618) possédant tous une *même* réfrangibilité ; si ce faisceau tombe sur un prisme, les rayons émergents sortiront parallèles entre eux suivant R_1R_1' ; car chaque élément du faisceau subit en pénétrant dans le prisme et en le quittant une déviation identique à celle des autres rayons qui arrivent sous la même incidence. Si donc la lumière solaire ne contenait que sept espèces de rayons, les faisceaux lumineux, en sortant d'un prisme, se diviseraient en sept groupes semblables aux deux groupes R_1R_1', R_2R_2' qui sont figurés ; chacun suivrait une route déterminée, et ces groupes, entremêlés d'abord jusqu'à une certaine distance, se sépareraient à mesure qu'ils s'éloigneraient du milieu réfringent, et peindraient, sur un écran placé assez loin, un spectre formé de sept bandes complétement séparées. Newton, dans ses expé-

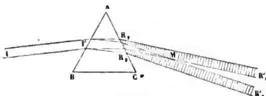


Fig. 618.

riences, bien qu'il réalisât les conditions les plus favorables, ne put jamais obtenir une séparation complète des couleurs, et il en conclut avec raison que les rayons lumineux qui forment le spectre n'ont pas sept réfrangibilités appartenant chacune à une couleur spéciale, mais qu'en réalité toute couleur est formée par une multitude de rayons lumineux dont les réfrangibilités varient par degrés insensibles d'une extrémité à l'autre du spectre, et que les réfrangibilités croissent d'une manière continue du rouge au violet extrême.

Mais une particularité importante, offerte par le spectre et qui avait échappé à Newton, a été plus tard reconnue par Wollaston et étudiée par Fraunhofer. Le spectre est divisé en une multitude de petites bandes, qui sont séparées les unes des autres par des espaces noirs très-étroits, ou plutôt par des lignes obscures dont la direction est perpendiculaire aux côtés du rectangle qui limitent le spectre. On leur a donné le nom de raies du spectre.

1249. **Raies du spectre.** — La meilleure manière de montrer ces raies à un auditoire consiste à interposer une lentille achromatique à une distance convenable entre le prisme et l'ouverture, on peut alors leur donner une extrême netteté. Voici, dans ce cas, comment l'on dispose l'expérience. Par une fente verticale O (*fig.* 619), les rayons solaires sont introduits dans

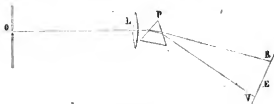


Fig. 619.

la chambre noire et reçus sur une lentille achromatique L dont la distance focale est de 0m,50 environ, et qui se trouve placée à un mètre de l'ouverture. On reçoit alors une image très-nette de la fente sur un écran situé derrière la lentille. Cette image est produite par les rayons solaires qui, se croisant à l'ouverture, forment par leur ensemble comme un objet lumineux; elle en a les dimensions et se trouve, comme nous l'avons établi (1216), à une distance double de la distance focale principale; de plus, la lentille étant achromatique, on n'aperçoit aucune coloration sur les bords de cette image. Mais, place-t-on sur le trajet des rayons lumineux un prisme P dont les arêtes soient verticales, ces rayons sont déviés, chacun selon sa réfrangibilité propre, et sur l'écran se peignent en RV les unes à la suite des autres, une foule d'images colorées séparées par de véritables lacunes où

la lumière fait complétement défaut, ce sont les raies si bien observées par Fraunhofer. Ces raies sont innombrables, si l'expérience est bien faite, et plus les conditions dans lesquelles on opère sont favorables à la séparation complète des couleurs, plus nombreuses sont les lignes obscures que l'œil peut distinguer. On peut donc dire, comme Newton, qu'il y a une multitude de rayons lumineux, mais il faut ajouter qu'il existe des solutions de continuité dans la série de leurs réfrangibilités.



Fig. 620.

L'importance de ces raies est grande pour le physicien, elles lui offrent de véritables repères qui permettent de désigner nettement avec quelle espèce de lumière ont été répétées les expériences dont il donne les résultats. Aussi, pour éviter toute confusion, est-on convenu de désigner les groupes de lignes les plus saillants qui se trouvent distribués dans les sept couleurs principales, par les huit premières lettres de l'alphabet; la raie A (*fig.* 620) étant marquée dans le rouge et la raie H vers le milieu du violet. Dès lors, on voit que, dans le spectre, les raies obscures sont comme des degrés qui présentent un avantage analogue à celui des degrés du thermomètre. Chacun peut toujours, sans équivoque, se reporter aux rayons qui ont été indiqués.

Tel a été, d'abord, le seul parti que l'on ait tiré de ce phénomène; mais bientôt l'étude des raies des spectres a acquis une bien autre importance. Fraunhofer lui-même reconnut que l'existence de telle ou

telle raie était liée intimement avec la nature de la source de laquelle émanaient les rayons lumineux. Tel est le sujet qui va nous occuper en ce moment.

1250. **Les raies caractérisent les diverses sources de lumière.** — Dès que Fraunhofer eut trouvé dans le spectre les repères qu'il y avait cherchés, il comprit que la découverte qu'il venait de faire ne devait pas avoir seulement un résultat pratique, et qu'elle allait probablement permettre de caractériser les diverses sources lumineuses. Dans ce but, il analysa la lumière des étoiles, et il reconnut que les spectres obtenus se distinguaient par un nombre et par un groupement de raies noires différents de ceux que présentait le spectre solaire. A chaque étoile, correspond un système spécial, mais toujours constitué par des lignes noires parallèles aux arêtes du prisme qui provoque la dispersion des rayons lumineux.

Quant à la lune et aux planètes qui sont éclairées par le soleil, elles donnent de la lumière qui offre à l'analyse toutes les particularités du spectre solaire.

1251. **Absence de raies dans les flammes ordinaires.** — Que l'on examine la flamme d'une lampe, d'un bec de gaz ou de toute autre source, qui ne contienne aucune trace de vapeur métallique, les spectres que l'on obtiendra avec ces flammes, en répétant l'expérience de Newton, et en prenant les dispositions les plus convenables pour faire apparaître les raies, offriront toujours une continuité parfaite, et il ne sera possible d'y apercevoir aucune ligne obscure. Toutefois, l'expérience ne réussit parfaitement qu'en recourant à des précautions que nous ne tarderons pas à faire connaître.

1252. **Raies produites par les gaz.** — Brewster, en réfléchissant sur les expériences qui viennent d'être rapportées, les rattacha à d'autres faits antérieurement observés et fut conduit, par cette relation qui le frappa, à tenter des essais nouveaux. Il avait remarqué que les solides et les liquides colorés interposés sur le trajet des rayons solaires produisent dans le spectre de larges solutions de continuité; ce sont des bandes noires d'une étendue plus ou moins considérable qui se montrent dans diverses régions du spectre. Les couleurs se trouvent souvent réduites à un moindre nombre par l'absence de plusieurs d'entre elles qui ont tout à fait disparu : le milieu coloré les a absorbées et l'espace, qui reste noir, est celui qu'elles auraient dû éclairer. Dès lors Brewster se demanda si les raies découvertes par Fraunhofer n'étaient pas dues à quelque milieu absorbant à travers lequel les rayons solaires auraient été obligés de passer. Mais, comme les liquides ou les solides colorés ne donnaient, par leur intervention, que des bandes noires très-étendues, il eut recours aux gaz, dans l'espérance qu'il verrait apparaître des lignes étroites comparables à celles du spectre solaire. Il réussit parfaitement. L'acide hypoazotique, placé dans un tube

sur le trajet soit de la lumière solaire, soit d'un bec de gaz, exerça un pouvoir absorbant tel que des raies nombreuses et nouvelles sillonnèrent le nouveau spectre, surtout dans la partie violette. Brewster crut même reconnaître que plusieurs de ces raies étaient exactement à la place occupée par quelques-unes de celles qui se remarquent dans le spectre solaire : ce dernier résultat aurait peut-être besoin d'être confirmé. Quoi qu'il en soit, Muller a constaté depuis que l'iode et le brome en vapeur produisaient des effets du même genre.

1253. **Raies brillantes des vapeurs métalliques.** — Les lignes noires, dont il vient d'être question, ne sont pas les seules qui aient été aperçues quand on a fait avec soin une analyse de la lumière. Les vapeurs métalliques incandescentes donnent des spectres que Fraunhofer avait étudiés, et au lieu de raies noires, il vit apparaître des lignes excessivement brillantes, qui variaient en nombre, en éclat et en étendue, selon la nature du métal : ces raies sillonnent d'ailleurs le spectre dans le même sens que les lignes obscures qui nous ont déjà occupé. M. Wheatstone a repris l'étude du même phénomène, Masson a étendu à un grand nombre de métaux des recherches semblables, et chacun de ces expérimentateurs a fixé les lignes principales qui caractérisent chaque métal.

Les vapeurs incandescentes s'obtiennent directement, quand le métal est volatil, en le portant à une haute température, et alors ces vapeurs peuvent être prises comme sources de lumière ; mais ce procédé n'est applicable qu'à un très-petit nombre de métaux. Le mieux est de faire jaillir l'étincelle électrique entre deux fils formés par le métal que l'on veut étudier : la machine de Ruhmkorff est excellente pour cet objet ; la succession rapide des étincelles fait voir le phénomène pour ainsi dire sans interruption. On peut aussi se servir du courant voltaïque pour réaliser la haute température nécessaire à la vaporisation d'un métal : on emploie dans ce cas l'appareil destiné à produire la lumière électrique (833) et l'on creuse le sommet du charbon inférieur d'une cavité dans laquelle on dépose un globule de métal. Celui-ci s'échauffe par le passage du courant, et en se volatilisant, il donne une teinte spéciale à l'arc voltaïque.

Enfin l'on peut encore observer une combinaison volatile dans laquelle entre le métal ; les raies que l'on obtient sont celles qu'eût données le métal employé directement. Un fil de platine imprégné de chlorure de potassium et maintenu dans une flamme pâle et très-chaude donne, en se volatilisant, les raies du potassium. La flamme que MM. Kirchhoff et Bunsen préfèrent est celle du gaz de l'éclairage brûlant avec une lueur pâle dans la lampe dite de Bunsen.

1254. **Pouvoir émissif et pouvoir absorbant d'une vapeur métallique.** — Un métal en vapeur donne un spectre qui offre toujours des raies brillantes d'une certaine réfrangibilité ; nous ne ferons que traduire

le phénomène, en disant que cette vapeur a le pouvoir d'émettre en grande quantité l'espèce de lumière correspondante à ces raies. Le spectre du sodium, par exemple, fournit une raie jaune excessivement éclatante ; le pouvoir émissif du sodium pour cette lumière jaune est donc considérable. Mais, quoique nous n'ayons fait qu'exprimer le phénomène sous une forme nouvelle, cette forme même reporte notre esprit vers deux principes importants que nous avons mis en évidence dans notre étude de la chaleur rayonnante ; elle rappelle d'abord l'identité que nous avons été conduits à reconnaître entre la chaleur rayonnante et la lumière, et en second lieu l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant, égalité qui est vraie quand on ne considère qu'une espèce de chaleur bien déterminée. Nous sommes donc amenés à rechercher quel est le pouvoir absorbant de la vapeur de sodium pour la lumière jaune que cette vapeur émet en si forte proportion, et de plus, nous sommes, *à priori*, portés à penser que ce pouvoir sera considérable.

Telle a été en effet l'idée de M. Kirchhoff, idée dont la justesse a été démontrée par le succès. Ce physicien a fait passer un rayon de lumière très-éclatant à travers la vapeur de sodium, et ce qu'il avait prévu est arrivé : le nouveau spectre s'est trouvé marqué d'une raie noire, à l'endroit même où la ligne jaune du sodium se montrait tout à l'heure, quand on formait exclusivement le spectre avec la vapeur de ce métal. C'est ainsi que ce principe bien compris de l'identité de la lumière et de la chaleur rayonnante a été l'origine toute naturelle d'une des plus importantes découvertes de notre époque.

Les recherches de M. Kirchhoff ont surtout porté sur les alcalis. Parmi les résultats qu'il a obtenus, nous citerons deux des plus nets : la vapeur de lithium donne un spectre réduit à deux raies principales, dont l'une est d'un rouge très-vif et se trouve comprise entre les raies B et C (*fig.* 620). Le potassium donne deux raies rouges très-belles dont l'une correspond exactement à la raie A du spectre solaire et l'autre à la raie B. Les raies de ces métaux ont été *renversées* et sont apparues en noir dans les spectres formés par les rayons lumineux très-intenses qui ont été obligés de traverser les vapeurs de ces métaux avant d'être décomposés par le prisme.

1255. **Méthode d'expérience de M. Kirchhoff.** — Pour observer ces phénomènes, M. Kirchhoff emploie une méthode d'expérience qui n'est autre d'ailleurs que celle de Fraunhofer. Il dispose la source de lumière (*fig.* 621) devant une fente O qui est placée au foyer principal d'une lentille convergente L'. Le faisceau lumineux qui pénètre à travers la fente dans le tube L'O donne en sortant de la lentille des rayons parallèles à l'axe (1218) qui tombent sur le prisme P placé dans la position qui correspond à la déviation minimum, et forment un spectre qui est reçu sur

une lentille convergente L. Cette lentille fournit, à son foyer, une image très-petite et très-brillante de ce spectre qu'on examine avec une loupe *l*, située à une distance convenable.

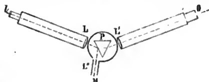


Fig 621.

Afin qu'il soit possible de comparer les positions respectives des raies, dans les expériences successives qui seront faites, M. Kirchhoff place latéralement à l'extrémité d'un tuyau L''M, une plaque de verre divisée par des lignes fines dont la direction est parallèle à la fente. Au bout L'' du tuyau une lentille semblable à L' est éloignée de M d'une longueur égale à sa distance focale. Et comme une face du prisme renvoie vers *l* les rayons qui ont traversé ML'', l'œil placé en *l* voit en même temps que le spectre les divisions grossies du micromètre.

1256. **Expérience.** — Avec cet appareil, si l'on veut observer la raie du sodium, on met devant la fente O la lampe à gaz, dans la flamme de laquelle on introduit un fil de platine chargé de chlorure de sodium, et l'on ne voit se projeter sur un fond peu éclairé qu'une raie jaune très-brillante qui est juste placée sur une division du micromètre que l'on peut noter.

Si l'on remplace la lampe à gaz par la lumière de Drummond, que l'on obtient en projetant sur la chaux un jet enflammé de gaz oxy-hydrogène, on n'aperçoit dans la partie jaune du spectre ni raie brillante ni raie obscure. Mais si l'on interpose entre la lumière de Drummond et la fente, la flamme de la lampe Bunsen, chargée de chlorure de sodium, celle-là même qui a été employée dans l'expérience précédente, ou bien, encore, la flamme de l'alcool salé, aussitôt une raie noire apparait exactement sur la division où la raie brillante indiquait auparavant une quantité considérable de lumière émise par le sodium. Ainsi que nous l'avons dit, l'expérience montre que le pouvoir absorbant de la vapeur du sodium est considérable pour cette même lumière à l'égard de laquelle son pouvoir émissif est maximum.

Il est une question que l'on pourrait se faire à ce sujet et que nous ne devons pas passer sous silence. Comment la vapeur incandescente du sodium, qui seule placée devant l'ouverture O donnait une ligne brillante, peut-elle obscurcir le spectre de la lumière de Drummond ? Si elle absorbe une partie de cette lumière, elle ne continue pas moins à en émettre qui lui soit propre, et toute celle qu'elle fournirait si elle était seule doit encore venir frapper le prisme. Cette remarque est juste; il est vrai de dire que la raie du sodium existe comme précédemment, mais sa clarté est si faible relativement à celle de la lumière éclatante qui l'environne et qui est due à la lumière de Drummond qu'elle se détache obscure

sur un fond clair. Mais lorsqu'elle est seule, elle se détache claire sur le fond obscur, parce que tout le reste du champ visible est peu éclairé.

1257. **Applications. MM. Kirchhoff et Bunsen. Découverte de deux métaux.** — Ces résultats obtenus, MM. Kirchhoff et Bunsen travaillèrent ensemble pour rechercher avec quel degré d'exactitude l'analyse de la lumière pouvait accuser la présence des divers métaux; ils constatèrent qu'il n'y avait pas de réaction chimique connue qui présentât un pareil degré de sensibilité. Pour en citer le plus bel exemple : 2 milligrammes environ de chlorure de sodium, disséminés dans l'atmosphère d'une salle ayant une capacité de 60 mètres cubes, ont donné à la flamme de la lampe qui brûlait dans cette salle, la coloration jaune caractéristique du sodium et, en regardant à travers l'appareil, on vit pendant dix minutes la raie jaune dont nous avons parlé.

Dès lors, une nouvelle méthode d'analyse chimique supérieure à toutes les autres était découverte et nos deux observateurs n'ont pas manqué, dès qu'une substance peu connue leur arrivait, de l'introduire dans la flamme de la lampe à gaz. Or, il est advenu que deux fois déjà (et c'est à peine si leur travail date d'une année), ils ont aperçu, à leur grande satisfaction, des raies brillantes qui ne s'étaient jamais montrées dans les autres spectres. Pour eux, il n'y eut plus de doute, l'apparition de ces raies nouvelles devint le signe certain de la présence dans la flamme de la vapeur d'un métal inconnu, et en effet, les réactions chimiques mirent bientôt en évidence les substances jusqu'alors ignorées qu'avait dévoilées ce nouveau procédé d'investigation. L'un des métaux découverts fut nommé *rubidium*, à cause de la belle raie rouge qui l'avait annoncé, et l'autre, qui fournit une belle raie bleue-verdâtre, fut nommé *cæsium*.

1258. **Métaux appartenant à l'atmosphère solaire.** — Une idée vraie est toujours féconde enconséquences. MM. Kirchhoff et Bunsen, qui le savent bien, n'ont pas manqué de poursuivre sans relâche leurs curieuses recherches, et ils n'ont pas hésité à déterminer par leur procédé, la nature chimique des métaux que renferme l'atmosphère du soleil.

« L'analyse par le spectre, écrivent-ils, ouvre aux investigations de « la chimie un champ jusqu'à présent inexploré et dont les limites s'étendent même au delà de notre système solaire. Comme cette nouvelle « méthode d'analyse n'exige que l'observation par la *vision* d'un gaz incandescent, on comprend facilement qu'elle doit être applicable à l'atmosphère du soleil et à celle des étoiles fixes; seulement elle subit une « modification par suite de la lumière qu'émettent les noyaux de ces « astres. » Dans un mémoire précédent « il a été démontré que le spectre « d'un gaz en combustion se trouve renversé, c'est-à-dire que les raies « brillantes deviennent obscures, lorsqu'un foyer lumineux assez intense « et donnant lui-même un spectre continu se trouve placé en arrière de la

« flamme de ce gaz. On peut conclure de ce fait que le spectre solaire avec
« ses raies obscures n'est autre que le spectre *renversé* de l'atmosphère du
« soleil. Par conséquent, pour analyser l'atmosphère solaire, il suffit de
« rechercher quels sont les corps qui, introduits dans une flamme, don-
« nent des raies brillantes coïncidant avec les raies obscures du spectre
« solaire. »

Par cette méthode, MM. Kirchhoff et Bunsen ont trouvé le fer, le chrôme, le nickel parmi les éléments de l'atmosphère solaire ; le fer, en particulier, donne jusqu'à soixante-dix raies brillantes qui ont chacune leur raie noire correspondante dans le spectre solaire : ce résultat ne peut laisser aucun doute sur la présence de sa vapeur dans le soleil. L'argent, le cuivre, le zinc et le plomb ne font pas partie de l'atmosphère solaire; car ces métaux, dont les spectres présentent des raies extraordinairement brillantes, n'en donnent aucune qui coïncide avec les raies obscures du spectre solaire.

ACTIONS DIVERSES PRODUITES PAR LE SPECTRE SOLAIRE.

Les radiations qui, par leur ensemble, constituent un spectre solaire, produisent trois genres d'effets, qu'il importe de signaler, ce sont les *effets lumineux*, *calorifiques* et *chimiques*.

1259. **Intensité lumineuse des diverses parties du spectre solaire.**— Lorsque l'on examine avec quelque attention un spectre solaire, on reconnait de suite que les différentes couleurs n'ont pas le même pouvoir éclairant. Une page imprimée en caractères fins par exemple, est beaucoup plus facile à lire dans la chambre noire quand on projette sur elle la lumière jaune du spectre, que lorsqu'on l'éclaire par l'emploi de tout autre rayon lumineux. Mais si l'on a pu constater qu'il y avait une différence entre les pouvoirs éclairants des différentes régions du spectre, on n'a pas jusqu'ici déterminé d'une manière satisfaisante les rapports entre leurs intensités lumineuses. Fraunhofer, dans diverses expériences faites à ce sujet, a trouvé des résultats assez peu concordants; cependant il est parfaitement certain que c'est entre les raies D et E que se trouve le maximum de clarté.

1260. **Effets calorifiques.**— Lorsqu'un thermomètre sensible stationne successivement dans les différentes parties du spectre, on trouve que ses indications sont très-variables d'un point à l'autre, et, chose remarquable, ce n'est pas dans les parties les plus lumineuses que la température s'élève le plus. Jusqu'à Melloni, les physiciens n'avaient pas été d'accord sur le mode de distribution de la chaleur dans le spectre solaire, ces divergences d'opinion tenaient à la différence de nature des prismes employés pour réaliser l'expérience. Melloni a fait voir que le sel gemme était la seule substance qui pût donner des résultats comparables. Il a démontré, le pre-

mier, que les milieux réfringents absorbaient très-inégalement les rayons calorifiques de diverses espèces, et que c'était à cela que les désaccords étaient dus. Le sel gemme seul laisse passer *à peu près* également bien les rayons calorifiques qui le traversent, quelle que soit leur espèce : il peut donc servir à reconnaître plus exactement que toute autre substance en quelle proportion la chaleur se trouve accumulée dans chacune des couleurs. Il résulte des expériences de Melloni que la température du thermomètre s'élève de plus en plus à mesure qu'on s'écarte du violet pour se diriger vers le rouge. En continuant le déplacement du thermomètre au delà du rouge, en le faisant arriver dans la partie obscure du spectre, la température croît jusqu'à une petite distance, puis un peu plus loin elle commence à baisser, pour décroître de plus en plus à mesure qu'on s'éloigne davantage du rouge. Toutefois, il y a encore une élévation de température sensible alors que l'instrument se trouve distant du rouge d'une longueur égale à celle du spectre visible.

Ce résultat très-remarquable prouve qu'au delà des limites du spectre dans des parties de l'écran atteintes par des rayons que l'œil ne perçoit pas, il existe encore des radiations qui émanent du soleil et dont le thermomètre accuse l'existence.

1261. **Effets chimiques.** — La lumière provoque, selon les cas, des combinaisons ou des décompositions chimiques. Le chlore et l'hydrogène sec, qui restent mélangés sans s'unir dans une obscurité profonde, se combinent sous l'influence des rayons lumineux. Les sels d'argent, au contraire, subissent une décomposition sous la même influence. Ce dernier mode d'action de la lumière, qui est utilisé dans le daguerréotype et dans la photographie, dépend de l'espèce des rayons qui tombent sur la substance sensible. La décomposition du chlorure d'argent commence dans la partie violette du spectre, puis elle a lieu successivement dans l'indigo, le bleu, etc.; elle est sensiblement nulle dans le jaune, le jaune orangé et le rouge.

1262. **Spectre ultra-violet.** — Un phénomène bien digne d'attention mérite d'être signalé : au delà du violet, dans la partie obscure, il s'opère une décomposition du sel d'argent : le chlorure noircit, et sur les parties attaquées, des raies apparaissent, dont la disposition est semblable à celle du spectre lumineux ; elles ressortent en blanc sur le fond noir du chlorure décomposé, indiquant ainsi des solutions de continuité dans la réfrangibilité des rayons actifs. Au delà du violet, existent donc des radiations particulières que l'œil n'est pas capable de saisir, auxquelles le thermomètre est aussi insensible, mais dont l'activité chimique est puissante. Nous arrivons ainsi à cette conséquence nécessaire, que le spectre complet formé par les radiations solaires se prolonge au delà du violet et au delà du rouge, et c'est seulement la partie moyenne du spectre total que nos yeux peuvent distinguer.

1263. **Rayons continuateurs.** — M. E. Becquerel a, le premier, signalé un autre fait remarquable : il a montré que les rayons les moins réfrangibles, qui ne décomposent pas le chlorure d'argent, peuvent cependant agir sur lui, quand la décomposition a déjà commencé à se produire sous l'influence des rayons actifs (violet, indigo, etc.). Une plaque, recouverte de chlorure d'argent et exposée à la lumière violette pendant un temps assez court pour que la plaque ne soit pas sensiblement altérée, devient sensible à l'action de la lumière rouge qui continue la décomposition à peine commencée par l'excitation de la lumière violette. Les rayons rouges, à cause de cette propriété, ont été appelés rayons *continuateurs*. Les rayons violets ou bleus, au contraire, sont des rayons *excitateurs*.

Enfin, il est une autre expérience de M. E. Becquerel, dans laquelle il a obtenu sur la plaque daguerrienne le spectre solaire avec ses couleurs propres. Malheureusement, aucune des tentatives, faites jusqu'à ce jour, n'a permis la fixation durable des épreuves. Pour réaliser l'expérience, on produit le chlorure d'argent à la surface d'une lame de ce métal en employant cette dernière comme pôle positif d'une pile qui sert à décomposer de l'acide chlorhydrique ; la plaque étant sortie du bain, le spectre reçu sur elle ne tarde pas à se montrer persistant avec ses couleurs naturelles, mais les teintes obtenues sont extrêmement fugaces, elles disparaissent, au bout de peu de temps.

1264. **Phosphorescence.** — Pour achever l'étude des effets de la lumière, il nous reste à signaler la propriété que présentent certains corps qui, après avoir été exposés quelque temps au soleil, apparaissent ensuite brillants dans l'obscurité, comme de véritables sources lumineuses. Cette propriété rappelle des phénomènes connus de tout le monde, alors qu'il s'agit de la chaleur. Un corps qui a été exposé au rayonnement d'un corps chaud devient lui-même une source de chaleur. De même un corps, exposé à l'action d'un corps lumineux, devient lumineux lui-même après que la source excitatrice a disparu. Le phosphore de Canton que l'on obtient en calcinant des écailles d'huîtres, est de tous les corps phosphorescents le plus anciennement célèbre. Après avoir subi l'insolation pendant quelque temps, il répand dans l'obscurité une lueur qui persiste pendant plusieurs minutes. La substance ne perd pas ses propriétés par les expériences successives auxquelles on la soumet. On peut renouveler ce genre d'essais sur le même corps aussi souvent que l'on veut, la réussite est certaine.

M. E. Becquerel a étendu considérablement le nombre des corps phosphorescents connus, et cela en employant un appareil ingénieux nommé *phosphoroscope*, qui permet d'apercevoir un corps quelques millièmes de seconde après son exposition au soleil, c'est-à-dire au moment où la phosphorescence est le plus intense et qui reproduit le même phénomène à des intervalles de temps assez rapprochés, pour que les impressions, qui se

succèdent, persistent sur la rétine comme si elles étaient continues. Peu de corps résistent à un pareil mode d'investigation.

Les phénomènes de phosphorescence présentent dans leurs manifestations des circonstances variées que M. E. Becquerel a étudiées. Il a recherché l'espèce des rayons qui les excitent, l'espèce de ceux qui sont émis par le corps devenu lumineux et enfin la durée appréciable pendant laquelle la lueur est perceptible.

1265. **Rayons qui produisent la phosphorescence.** — M. E. Becquerel a reconnu que les diverses espèces de rayons solaires n'étaient pas également aptes à communiquer aux corps la faculté d'être phosphorescents. Les rayons qui la communiquent le mieux sont en général les rayons les plus réfrangibles : les rayons situés dans la partie obscure du spectre, ceux qui sont au delà du violet, sont particulièrement aptes à engendrer la phosphorescence. Quant aux rayons émis par un corps phosphorescent, ils sont moins réfrangibles que ceux qui ont servi à rendre manifeste la propriété de répandre une lueur dans l'obscurité.

1266. **Espèce de lumière donnée par les corps phosphorescents.** — La couleur de la lumière émise varie suivant la substance, et quelquefois même suivant son état physique : le spath calcaire fait apercevoir une lueur orangée, l'alumine émet de la lumière rouge, l'azotate d'urane donne du vert et le sulfate de strontiane, rayonne de la lumière rouge, verte, bleue ou orangée, selon le mode de préparation qui a fourni le sel.

1267. **Durée du phénomène.** — Le temps pendant lequel la phosphorescence persiste est très-variable d'une substance à l'autre. Voici quelques résultats :

NOM DE LA SUBSTANCE.	DURÉE DE LA PHOSPHORESCENCE.
Sulfure de strontium........ ...	Plusieurs heures.
Le spath calcaire..............	$\frac{1}{3}$ de seconde.
L'alumine.	$\frac{1}{20}$ —
L'azotate d'urane..................	$\frac{1}{100}$ —
Le platino cyanure de potassium.....	$\frac{1}{5000}$ —

1268. **Phosphorescence du sulfate de quinine.** — Parmi les corps phosphorescents, il en est un qui présente un très-bel éclat, c'est la dis-

solution acide de sulfate de quinine; mais si sa phosphorescence est vive, elle ne dure que pendant un temps extrêmement petit. M. E. Becquerel l'évalue à $\frac{1}{10000}$ de seconde. Ce sont les rayons ultra-violets surtout qui la produisent et qui donnent une lueur si intense qu'elle peut être aperçue même en plein jour. Place-t-on dans un verre une dissolution de sulfate de quinine? on reconnait que la dissolution offre une teinte bleue du côté par lequel arrive la lumière.

Les rayons qui produisent cette phosphorescence, sont surtout, avons-nous dit, les rayons ultra-violets. On peut s'en assurer, en recevant le spectre solaire sur un papier imprégné de cette dissolution, il se colore aussitôt d'une teinte bleue dans la partie habituellement obscure qui est au delà du violet : des radiations qui n'impressionnent pas directement notre rétine sont donc capables, sous certaines conditions, de provoquer des radiations que notre œil peut saisir, et, phénomène bien digne de remarque, cette teinte bleue est sillonnée de raies identiques à celles qui se dessinent sur la plaque de chlorure d'argent. Du reste, le sulfate de quinine n'est pas la seule substance qui produise des effets de ce genre.

ACHROMATISME.

1269. L'aberration de réfrangibilité des lentilles, que nous avons plusieurs fois constatée dans les précédents chapitres et dont nous connaissons actuellement la cause, est un inconvénient très-grave, qui compromet le succès de la plupart des expériences d'optique; elle empêche la formation des images nettes. Les espaces brillants, au lieu d'être limités par des traits fins, le sont par des lignes épaisses où se trouvent séparés les divers éléments du spectre. Chaque ligne empiète quelquefois tellement sur les espaces voisins, que, dans certaines circonstances défavorables, il peut arriver que l'image soit tout à fait méconnaissable. Newton, trompé par des expériences incomplètes, affirma avec trop de précipitation, qu'il était impossible de corriger ce défaut, attendu que, selon lui, on ne pouvait supprimer la dispersion dans un système réfringent qu'en annulant en même temps la réfraction, c'est-à-dire en ôtant au prisme et aux lentilles leurs propriétés essentielles. Mais, peu de temps après, un amateur nommé Hall, et un peu plus tard Dollond, montrèrent de la manière la plus nette, l'erreur dans laquelle Newton était tombé; ils parvinrent à construire des lentilles donnant des images incolores. Ces lentilles sont dites *achromatiques*.

1270. **Achromatisme des prismes.** — Dans le but de faire comprendre comment Newton était arrivé à la conclusion dont nous venons de parler, et comment, d'autre part, l'achromatisme est possible, considérons d'abord la marche de la lumière dans les prismes qui, ainsi que nous l'avons dit,

peuvent être regardés comme identiques aux différents éléments dont se compose une lentille. Un rayon qui traverse une lentille est en effet dans les mêmes conditions que celui qui traverse un prisme, et tout ce qui est démontré relativement à la marche de la lumière dans cette dernière espèce d'appareils peut s'appliquer tout aussi bien aux lentilles.

Soit ID (*fig.* 622) un rayon de lumière blanche qui tombe sur la face AB du prisme ABC. Ce rayon, décomposé par le prisme, donne un spectre limité, d'un côté, par le rayon rouge RR', et de l'autre, par le rayon violet VV'.

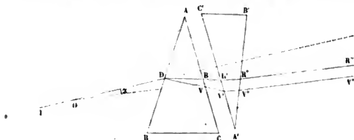


Fig. 622.

L'angle formé par ces deux rayons extrêmes s'appelle l'angle de dispersion du prisme, et c'est la valeur de cet angle qui détermine l'étendue des bandes irisées ou de l'aberration chromatique. Un prisme A'B'C', placé d'une manière inverse par rapport au prisme ABC, dévie les deux rayons RR' et VV' en sens inverse, et les rayons émergents R"R‴, V"V‴, pourront, par un choix convenable du prisme A'B'C', être rendus parallèles comme dans l'expérience des prismes opposés. Mais la déviation produite par le premier prisme sera évidemment diminuée pour le second, et même n'est-il pas à craindre que finalement les rayons émergents ne soient devenus parallèles aux rayons incidents ID. Ceci aurait lieu infailliblement si le second prisme A'B'C' était de même nature et de même angle que le prisme ABC. Dans ce cas, la dispersion serait détruite, il est vrai, mais la déviation le serait aussi. Newton affirmait qu'il ne pouvait pas en être autrement, et que, quelle que fût la nature du prisme A'B'C' l'achromatisme n'était possible qu'à une condition, c'est que le système achromatique ne déviât pas du tout de la lumière, ce qui revient en définitive à le rendre inactif. Heureusement, la perspicacité de Dollond et son habileté comme constructeur ne tardèrent pas à montrer qu'il suffisait d'accoler deux prismes possédant des pouvoirs réfringents différents et dont les angles fussent convenablement choisis pour rendre un système achromatique, du moins pour les couleurs extrêmes, sans lui enlever la propriété de dévier les rayons lumineux ; ainsi un prisme de flint-glass peut achromatiser un prisme de crown-glass.

1271. Expérience. — Dans les cours, on emploie pour faire cette démonstration deux prismes P et P′ (*fig.* 623) taillés sous des angles convenables, capables de donner deux spectres également dilatés; ils produisent la même dispersion sans déterminer la même déviation. D'après cela, quand ces prismes sont opposés, l'un corrige la dispersion de l'autre, mais les faisceaux émergents n'en font pas moins un angle avec les rayons incidents.



Fig. 623.

Une autre expérience permet d'observer ce résultat. Sur le trajet des rayons réfractés par un prisme à arêtes horizontales, on place un vase dont deux côtés opposés sont formés par deux glaces L et L′ mobiles autour de charnières (*fig.* 624). Les glaces étant d'abord placées parallèlement et le vase étant plein d'eau, le spectre n'est pas modifié, mais à mesure que l'on écarte les deux glaces de leur parallélisme primitif, et que l'on forme ainsi un prisme opposé au premier, les rayons rouges et les rayons violets se rapprochent peu à peu, le spectre solaire s'efface, et quand il a disparu et qu'une image blanche se peint sur l'écran, on reconnaît que la déviation n'est pas pour cela annulée. Le faisceau émergent fait encore un angle appréciable avec le faisceau incident. Si l'on continuait à ouvrir l'angle du prisme liquide, les rayons rouges et les rayons violets finiraient par se croiser pour se séparer ultérieurement.

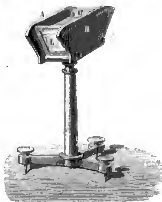


Fig. 624.

1272. Achromatisme des lentilles. — Les deux éléments de surface, que rencontre un rayon lumineux en traversant une lentille, peuvent être considérés comme appartenant à un prisme. La dispersion que subit la lumière blanche en traversant un pareil milieu peut donc être combattue avec succès par un milieu de même forme, mais qui joue le rôle de prisme opposé. Une lentille divergente de flint-glass associée avec une lentille convergente de crown-glass donne par une courbure convenablement choisie des surfaces qui la constituent un ensemble doué de la propriété de rassembler en un même foyer les rayons de deux réfrangibilités différentes, si bien que les rayons rouges et les violets émanés d'un point lumineux A situé à distance viennent, après les réfractions successives, former leur foyer en un même point A′. Ce sont ces lentilles que l'on emploie

comme *objectifs* dans les instruments d'optique que nous décrirons bientôt.

1273. **Imperfection de l'achromatisme.** — Que l'on se reporte à ce qui a été dit pour l'achromatisme des prismes, et l'on comprendra que deux prismes combinés ne donnent qu'un achromatisme imparfait. Dans l'exemple que nous avons développé (1270), les rayons rouges et les violets ont émergé parallèles entre eux ; mais rien n'indique que les autres rayons sortiront exactement parallèles aux deux précédents. En fait, ce parallélisme n'a pas lieu, mais il est, le plus souvent, très-approché. Deux prismes associés ne pouvant achromatiser que deux espèces de rayons, on choisit pour ces rayons ceux qui sont les plus éclatants et qui donneraient aux images la coloration la plus sensible aux yeux : c'est le jaune et le bleu. Il en est de même pour les lentilles : l'achromatisme imparfait de l'objectif est d'ailleurs amélioré dans les instruments d'optique au moyen d'un second système de verre très-différent du premier et dont nous parlerons plus loin.

CHAPITRE VI

DE LA VISION (*)

1274. L'étude de l'œil, qui fera le sujet de ce chapitre, appartient surtout à la physiologie, mais, en fait, les physiciens ont beaucoup contribué, par leurs travaux, aux progrès de la théorie de la vision. Cette sorte d'empiétement sur le domaine d'une science voisine, est facile à concevoir : l'expérimentateur qui s'occupe des phénomènes de l'optique, ne peut pas rester indifférent à la connaissance de l'organe à l'aide duquel ils lui sont dévoilés ; il lui est nécessaire d'en connaître, soit les défauts pour les corriger, soit les qualités pour que, à l'occasion, il puisse les mettre à profit. A cet intérêt, qui suffirait seul pour diriger ses recherches vers l'étude de la vision, s'en joint un autre non moins puissant. L'œil est un véritable instrument d'optique tout à fait comparable à ceux que les physiciens emploient dans leurs expériences : les milieux, dont il se compose, sont limités par des surfaces semblables à celles des diverses pièces qui entrent dans la construction des instruments dont on

(*) Pour la rédaction de ce chapitre, nous avons puisé dans un ouvrage inédit que l'auteur, M. Janssen, a bien voulu nous communiquer.

fait usage pour l'étude de la lumière; ces milieux présentent un ensemble invariable ou presque invariable dans la disposition de leurs parties, et il est presque aussi facile de suivre les phénomènes qui s'y accomplissent que si l'organe n'était pas actuellement sous l'influence de la vie.

Toutefois, quelle que soit la puissance des raisons qui nous entraînent à prendre l'œil comme objet de cette étude, nous n'oublierons pas que notre seul droit est de nous occuper des conditions physiques de la vision. Les conditions physiologiques de la sensation sont entièrement hors de notre compétence. Ainsi, dès que la lumière sera venue en contact avec le nerf chargé de transmettre les impressions au cerveau, nous nous arrêterons en laissant aux physiologistes le soin de compléter la solution du problème et d'étudier l'espèce de *conflit qui a lieu entre la rétine et le sensorium*.

1275. **Description de l'œil.** — C'est Kepler qui, le premier, à la fin du seizième siècle, a reconnu la marche véritable que la lumière suit à travers les milieux de l'œil. Peu de temps après la découverte de la chambre noire, il trouva que l'organe de la vue était un appareil optique où se trouvaient réalisées les conditions que Porta avait ingénieusement combinées pour obtenir l'image des objets extérieurs. Les travaux que l'on a faits depuis sur ce sujet, ont prouvé, en outre, qu'aucune des chambres noires exécutées par les physiciens n'approchait, pour la perfection des résultats obtenus, de celle qui se trouve réalisée dans le globe oculaire.

Cette chambre a ses parois constituées par une membrane fibreuse S (*fig.* 625) nommée *sclérotique*, qui est opaque, sauf dans la partie antérieure de l'œil T où sa transparence lui a fait donner le nom de *cornée transparente;* par opposition, le reste de la sclérotique est souvent appelé *cornée opaque*. Enchâssé derrière la cornée transparente, le *cristallin* C représente la lentille convergente de la chambre noire de Porta; il se trouve enveloppé d'une membrane transparente formant une sorte de poche : la *capsule* du cristallin. L'action qu'il exerce pour former l'image

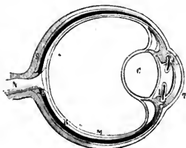


Fig. 625.

se combine avec celle des deux liquides qui le baignent : l'un d'eux, l'*humeur aqueuse*, occupe l'intervalle compris entre le cristallin et la cornée transparente; le second, le *corps vitré*, substance gélatineuse, remplit tout l'espace libre entre le cristallin et le fond de l'œil. Enfin, l'image des objets extérieurs qui est produite par la transmission de la lumière à travers ces milieux réfringents, ne tombe pas sur les parois de la sclérotique qui sont insensibles, elle est reçue par une membrane nerveuse, la *rétine* R,

qui tapisse le fond de l'œil. Formée par une expansion du *nerf optique* N, cette membrane est un écran dont toutes les parties possèdent une sensibilité exquise pour la lumière; et, sans entrer dans la question physiologique, nous pouvons dire que les actions exercées en des points différents atteints par la lumière, se transmettent, sans confusion, jusqu'au centre nerveux.

Au point de vue optique, les parties de l'œil que nous venons de décrire sont les plus essentielles; mais il en est encore d'autres qui servent à la perfection de l'organe. Ainsi, derrière la rétine, une membrane, la *choroïde*, est recouverte d'un pigment noir qui absorbe la lumière et empêche les réflexions intérieures : cette membrane, très-vasculaire, sert d'ailleurs à la nutrition de l'organe. Au-devant du cristallin, un diaphragme à ouverture variable II' permet à la lumière de pénétrer avec plus ou moins d'abondance; il est formé par une membrane contractile, l'*iris*, que tout le monde peut distinguer à travers la cornée transparente : c'est elle qui donne aux yeux la couleur bleue, grise ou noire variable d'un individu à l'autre. L'ouverture de ce diaphragme, qui correspond à la partie centrale de l'iris, prend le nom de *pupille*.

1276. **Marche de la lumière à travers les milieux de l'œil.** — La marche de la lumière à travers l'œil est facile à suivre, si l'on se reporte à la théorie des milieux terminés par des surfaces courbes. Considérons, par exemple, un objet AB (*fig.* 626) : de chaque point de cet objet, du point A,



Fig. 626.

si l'on veut, partent des rayons divergents qui viennent tomber sur la cornée transparente, un certain nombre de ces rayons pénètre dans l'œil. Au passage de l'air dans la cornée et dans l'humeur aqueuse, ces rayons, de divergents qu'ils étaient d'abord, deviennent convergents et leur convergence augmente encore après qu'ils ont traversé le cristallin dont le pouvoir réfringent est supérieur à ceux des milieux qui l'entourent. Ces rayons vont alors se réunir sur la rétine en A' où ils forment un foyer conjugué du point A. Il en est de même pour tous les points de l'objet, et l'ensemble de tous ces foyers conjugués constitue une image A'B' réelle et renversée de cet objet.

1277. **Les images se peignent sur la rétine renversées.** — Ainsi les images se peignent sur la rétine, et elles se peignent renversées;

notre construction suffit pour le prouver ; il est bon cependant de le démontrer par expérience. C'est ce que Magendie faisait avec l'œil d'un lapin atteint d'albinisme, c'est-à-dire dont la choroïde, ne contenant pas de pigment noir, mais bien une matière colorante blanche et translucide, se laisse facilement traverser par la lumière. L'œil étant isolé et placé devant un objet vivement éclairé, l'image renversée de cet objet s'observe très-nettement sur la rétine. La même expérience réussit avec un œil de bœuf ou de mouton dont on amincit la sclérotique, dans les portions placées en regard de la cornée transparente ; mais on voit cette fois le phénomène moins distinctement.

Ce renversement des images a beaucoup préoccupé les physiologistes ; ils se sont demandé comment il était possible que les objets nous parussent droits dans de pareilles conditions. C'est une question que nous n'avons pas à traiter : toutefois, nous croyons pouvoir dire que c'est une difficulté dont il n'y a pas à s'inquiéter pour le moment, puisque nous n'avons aucune notion sur la manière dont une impression exercée sur l'organe se change en une sensation.

1278. **Axe optique.** — L'assimilation des milieux de l'œil à une lentille unique nous entraîne à considérer les lignes AA', BB' (*fig.* 626) comme tout à fait semblables à celles que nous avons appelées des axes secondaires (1213), et à nommer centre optique de l'œil le point où elles se croisent, point qui est à peu près au centre de l'œil. Parmi ces lignes, il en est une qui passe par l'axe géométrique de l'organe et à laquelle on donne le nom d'*axe optique ;* tout le monde peut s'assurer que cet axe se dirige spontanément vers le point que l'œil veut fixer.

1279. **Angle visuel.** — Les limites de l'image, qui se forme sur la rétine, sont déterminées par les deux axes secondaires dont l'un atteint l'un des bords de l'objet et dont l'autre arrive au bord opposé. L'écartement de ces axes est appelé *angle visuel :* il règle les dimensions de l'image, et par suite détermine la grandeur avec laquelle l'objet nous apparait. L'angle visuel qui donne le *diamètre apparent* d'un objet change d'ailleurs de grandeur quand l'objet se déplace, et sa valeur est inversement proportionnelle à la distance.

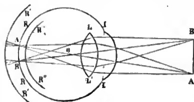


Fig 627.

1280. **Distance de la vue distincte.** — Un écran placé derrière une lentille ne reçoit l'image nette d'un corps éclairé que s'il est placé à l'endroit même RR (*fig.* 627) où cette image se forme. S'il se trouve, par rapport à la lentille LL', plus proche, en R''R'', ou plus éloigné, en R'R', les rayons émanés de chaque point de

l'objet éclairent une large portion de la surface qui les reçoit ; de là naît une confusion qui enlève toute netteté à l'image. Ce résultat se produit sur la rétine, quand l'objet est trop rapproché ou trop éloigné de l'œil, pour former distinctement son image sur l'écran qui est constitué ici par l'épanouissement du nerf optique.

L'imperfection de la vue, que vient de nous faire concevoir la théorie, devient manifeste par les expériences les plus simples. Ainsi, que l'on place à 3 ou 4 centimètres de l'œil un petit objet brillant tel que la tête d'une épingle, et au lieu de l'objet on apercevra une nébulosité confuse dont les bords seront imparfaitement limités. On appelle *distance de la vision distincte* la distance à laquelle un objet doit être placé pour être vu le plus nettement possible ; elle est en moyenne de 30 centimètres, mais elle varie, selon les individus, entre des limites assez larges. Lehot a construit un appareil qui permet de la déterminer pour les différentes vues.


Fig. 628.

Un fil blanc *a* (*fig.* 628) est tendu horizontalement sur un fond noir. On le regarde en plaçant l'œil au-dessus de l'une des extrémités et derrière un écran percé en O d'une ouverture convenable ; il apparaît alors très-nettement délimité dans une certaine longueur : plus près ou plus loin, il semble renflé et donne la sensation d'une petite surface blanche de plus en plus large à mesure qu'on s'écarte davantage du point où il est vu distinctement. On arrive donc assez promptement, par ce procédé, à une mesure directe de la *distance de la vision distincte*.

1281. **L'œil peut s'accommoder pour voir à différentes distances.** — Si l'on s'en tenait à considérer l'œil comme une chambre noire, dont toutes les parties seraient invariables et invariablement situées à la même distance d'un objet extérieur, il est clair qu'il n'y aurait qu'une distance déterminée à laquelle un objet serait parfaitement visible.

Mais tout le monde sait par expérience que la vue est loin d'être aussi imparfaite : l'œil se porte-t-il sur un objet placé à 15 centimètres de distance, par exemple sur un fil métallique très-brillant? il le voit parfaitement limité, tout aussi bien que s'il était à la distance de 30 centimètres. Mettons le même fil à une distance de 40 centimètres, de 50 centimètres, et même beaucoup plus loin, à plusieurs mètres de distance, la netteté continue à être parfaite pour les vues assez bonnes. L'œil possède donc une faculté d'accommodation, et chacun de nous d'ailleurs en a conscience. Plaçons deux points lumineux à des distances très-différentes de l'œil, nous sentons l'effort exercé pour voir successivement celui qui est le plus proche et celui qui est le plus éloigné.

La meilleure manière de reconnaître cette faculté consiste à mettre deux épingles l'une devant l'autre ; un seul œil étant ouvert, on considère l'épingle la plus voisine, qui paraît d'abord confuse, si elle est près de l'œil ; mais par un effort de volonté exercé sur l'organe, l'image devient très-nette. Si, tout en conservant la netteté de cette image, on porte son attention sur l'impression que produit la seconde épingle, on reconnaît qu'elle donne une image confuse et sans netteté. Mais vient-on à faire un effort pour distinguer les contours de l'épingle la plus éloignée, on y parvient, et l'épingle la plus voisine ne donne plus alors qu'une image mal définie.

Cette faculté d'accommodation a beaucoup embarrassé les physiologistes et les physiciens : les uns se sont tirés d'affaire en la niant ou à peu près ; les autres ont voulu que le fond de l'œil pût se mouvoir comme l'écran de la chambre obscure ; d'autres ont attribué à la cornée transparente la faculté de se bomber, de manière à en changer le pouvoir convergent et à diminuer ou à augmenter la distance focale de l'appareil optique. On a aussi pensé à un déplacement exécuté par le cristallin et au changement de courbure des surfaces qui le limitent ; mais, jusqu'à ces dernières années, les anatomistes et les physiologistes en ont nié la possibilité. C'est à M. Cramer que l'on doit d'avoir montré quelle direction il fallait suivre pour résoudre la question, et c'est M. Helmholtz qui a donné la solution précise, et on pourrait dire mathématique, des difficultés qu'elle renfermait.

1282. **Expériences de M. Cramer.** — M. Cramer trouva moyen de déterminer, sur l'œil vivant, le rayon de courbure de la cornée, et celui des deux faces du cristallin. Il eut recours, dans ce but, à une expérience que Samson avait déjà faite pour l'étude de certaines maladies de l'œil : cette expérience consiste à observer les images que donne une source lumineuse dont les rayons viennent frapper la surface de chacun des milieux réfringents. Une bougie L (*fig.* 629) étant placée devant l'œil O', par exemple, la lumière qu'elle émet et qui tombe sur la cornée transparente pénètre comme nous l'avons dit ; mais elle ne pénètre qu'en partie : une portion est réfléchie, et il se forme, comme dans le cas d'un miroir convexe, une image droite A de

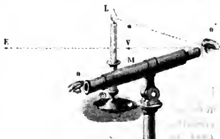


Fig. 629.

la flamme (*fig.* 630) ; cette image est très-facile à distinguer. La lumière, qui a pénétré et qui traverse la pupille, tombe sur la face antérieure du

cristallin, qui produit encore l'effet d'un miroir convexe et une seconde image droite B se forme. Cette seconde image est plus pâle et plus grande que la précédente. Enfin la lumière qui a pénétré dans le cristallin arrive sur sa face postérieure, une partie se réfléchit, et en se réfléchissant sur un miroir concave, elle donne une image renversée C; cette image d'ailleurs est très-petite et par suite très-brillante. Pour observer ces images, M. Cramer se servait d'un microscope M muni d'un réticule permettant de mesurer la grandeur des images. Ce microscope était installé devant l'œil O' (*fig.* 629) à observer, et on remarquait les changements qui se produisaient dans la grandeur des images, lorsque l'œil passait de l'observation des objets voisins tels que V à celle des objets éloignés E. C'est ainsi que ce savant put constater :

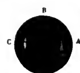


Fig. 630.

1° Que l'image A (*fig.* 630), qui se forme à la surface de la cornée, reste, dans les deux cas, de grandeur invariable, d'où il résulte que la forme de la partie antérieure du globe de l'œil est invariable elle-même;

2° Que l'image B, qui se forme à la première surface du cristallin, diminue à mesure que l'œil regarde de plus près, ce qui démontre que cette face de la lentille cristalline se bombe de plus en plus, et dès lors que sa distance focale doit diminuer : résultat conforme aux exigences de la théorie, pour que les images puissent, dans la vision des objets rapprochés, venir se former sur la rétine;

3° Que la troisième image C, celle qui est produite par la face postérieure du cristallin, reste à peu près invariable.

Les résultats de Cramer sont très-faciles à constater. En se mettant devant l'œil de celui qui regarde successivement deux objets différemment éloignés, on peut dire nettement, même sans aucun instrument, par la dimension des images de la bougie, vers lequel des deux objets le regard vient se porter.

1283. **Étude de M. Helmhotz.** — M. Helmhotz, qui ne connaissait pas les expériences de M. Cramer, en a fait d'autres qui sont du même genre; mais il a apporté plus de précision dans les mesures. Les changements de courbure étaient déterminés au centième de millimètre, et il a calculé que ces changements étaient suffisants pour amener dans tous les cas l'image des objets à se former sur la rétine.

Ces résultats remarquables résolvent d'une manière définitive la question du mécanisme de l'accommodation; ils nous montrent que c'est dans le cristallin seul que réside cette précieuse faculté.

1284. **Myopie.** — D'après ce qui précède, on pourrait dire, qu'il n'y a pas, à proprement parler, pour chaque individu, une distance bien définie qui puisse être appelée distance de la vision distincte, et cela est vrai : mais la faculté, que l'œil possède, de s'accommoder aux distances a des li-

mites qui varient selon la conformation des différents yeux. Les vues dites myopes sont celles qui n'aperçoivent bien que les objets très-voisins, et qui ne peuvent pas s'accommoder pour obtenir une perception nette des objets placés à une distance de quelques décimètres. Elles ont un avantage, c'est qu'elles permettent l'observation de détails qui échappent à une vue dite normale; car, l'objet à examiner pouvant être mis très-près de l'œil, le diamètre apparent sous lequel il est vu se trouve augmenté: par suite, sur la rétine, se forme une image dont les grandes dimensions facilitent la distinction de ses diverses parties. Mais ces vues myopes ont un inconvénient très-grave, dès qu'il s'agit de prendre une connaissance exacte des objets qui ne sont pas très-rapprochés; le myope, dans un musée, voit mal les tableaux; à la campagne, il ne distingue que vaguement les formes dans le lointain; sa faculté d'accommodation, qui est très-restreinte, le prive évidemment d'une foule de jouissances.

Il est facile de voir à quoi tiennent ces qualités et ces défauts des myopes : les objets très-rapprochés leur apparaissent avec netteté; il est donc évident qu'alors ces objets forment une image nette sur la rétine. Quand l'objet s'éloigne, l'image ne va plus se former au fond de l'œil, elle se produit plus près du cristallin (1216). et, faute d'un pouvoir d'accommodation suffisant, le croisement des rayons qui donne l'image réelle du point lumineux ne peut pas être amené à s'effectuer sur la rétine. On corrige ce défaut en plaçant devant les yeux des verres concaves L (*fig.* 631). Les rayons, émanés de chaque point A d'un objet éloigné (1229), possèdent alors. après avoir traversé la lentille concave, le même écartement que s'ils partaient d'un point A' plus rapproché de l'œil, et la vision distincte de cet objet éloigné devient possible pour le myope.



Fig. 631.

1285. **Vues presbytes.** — Les presbytes ont le défaut contraire; la distance focale correspondante à la distance de leur vision distincte est plus grande que dans l'état normal, et l'accommodation ne peut pas se réaliser pour les objets voisins; il est clair qu'on remédiera à ce défaut en plaçant devant l'œil une lentille convexe qui fera diverger comme d'un point éloigné A' (*fig.* 632) les rayons émanés du point voisin A (1216 *bis*).

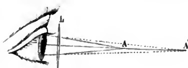


Fig. 632.

Les considérations précédentes contiennent toute la théorie des lunettes. Ajoutons seulement que le presbytisme est une affection qui survient gé-

néralement avec l'âge, tandis que la myopie est naturelle ou se déclare à la suite de certaines maladies de l'œil.

1286. **Achromatisme de l'œil.** — Outre la propriété merveilleuse que possède l'œil de s'accommoder aux distances et qui en fait un organe si parfait, il en est une autre que les physiciens n'ont jamais pu réaliser d'une manière aussi complète dans leurs instruments, je veux parler de l'achromatisme. Quand on regarde un objet blanc se détachant sur un fond noir, on ne voit apparaître aucune frange colorée à la limite de séparation du blanc et du noir; tandis que, dans les mêmes circonstances, une lentille ordinaire donne une image limitée par une ligne présentant les couleurs du spectre. Si la rétine recevait une pareille image, les bords de l'objet paraîtraient à l'observateur mal définis et comme entourés d'une auréole colorée. Puisqu'il n'en est rien, c'est que l'œil est achromatique. Quelques expériences, il est vrai, tendraient à établir que l'achromatisme de l'œil n'est pas parfait; mais ces expériences ne sont pas faites dans les conditions normales.

Aucune des explications, qui ont été données de l'achromatisme de l'œil, ne se trouve appuyée sur des preuves concluantes; aussi, nous contenterons-nous de signaler le fait, sans entrer dans aucun détail sur les théories proposées.

1287. **Absence d'aberration de sphéricité.** — Ce que l'on comprend beaucoup mieux, c'est l'absence d'aberration de sphéricité dans l'œil. Le diaphragme, que nous plaçons devant nos lentilles pour diminuer ce défaut quand il devient trop fâcheux, est ici représenté par l'iris dont l'ouverture est variable, et qui intercepte à l'occasion les rayons marginaux. Il n'est pas douteux, d'autre part, que la constitution anatomique du cristallin, qui est formé de couches concentriques dont le pouvoir réfringent va en augmentant à mesure qu'on s'approche du centre, ne contribue pour beaucoup à rendre l'organe plus parfait, à ce dernier point de vue.

1288. **Vision binoculaire.** — Jusqu'ici, nous nous sommes occupés de la vision telle qu'elle a lieu, quand un œil seul se trouve dirigé vers un objet. Pour compléter notre étude, il est indispensable, à présent, de rechercher quelles sont les particularités que présente la vision habituelle effectuée avec les deux yeux.

Dans la vision binoculaire, les axes optiques des deux yeux se dirigent, à la fois, vers le même point. Quand ce point est très-rapproché, les axes font un angle assez grand qui diminue, d'ailleurs, de plus en plus, à mesure que le point observé s'éloigne, et qui devient nul quand le point lumineux est à l'infini. On croit que c'est à cette inclinaison, dont nous avons conscience, qu'il faut attribuer, en partie du moins, le jugement que nous portons sur la distance d'un objet; mais il ne faudrait pas s'y tromper, les dégradations d'ombre et de lumière, l'angle visuel sous lequel nous obser-

vons, donnent des indications plus sensibles, et dont nous tenons surtout grand compte, lorsqu'il s'agit de juger de la distance d'objets très-éloignés.

Deux images d'un même objet se forment, l'une au fond de l'œil droit, l'autre au fond de l'œil gauche. Chaque point visible produit donc deux impressions exercées chacune sur une fibre nerveuse différente. Cependant, nous n'avons pas la conscience de deux sensations distinctes; les impressions s'accordent (c'est l'expérience journalière qui le montre) pour signaler la présence d'un point lumineux unique. C'est une question physiologique des plus délicates que celle de savoir comment deux actions séparées, s'exerçant en deux points différents de notre organisme, peuvent arriver à se composer en une sensation unique : nous en abandonnons l'étude à qui de droit.

1288 *bis*. **Des deux perspectives qui s'offrent à un même spectateur.** — En second lieu, les yeux dirigés vers le même objet ne le voient pas exactement sous le même aspect : l'œil droit et l'œil gauche, à cause de leurs positions respectives et de leur distance mutuelle, regardent de deux stations différentes, et le spectacle qui s'offre à eux ne saurait être le même pour l'un et pour l'autre à cause de la différence des deux points de vue. Si l'on veut s'en convaincre, on n'a qu'à placer un cube à une petite distance, de telle façon que deux de ses arêtes verticales soient dans un plan perpendiculaire à la ligne droite qui joint les centres des deux yeux; une des faces D (*fig*. 633, *a*) de ce cube, celle qui est à la droite du spectateur, apparaîtra large quand l'œil droit sera seul ouvert, l'autre face G paraîtra étroite. L'effet inverse se manifestera (*fig*. 633 *b*), quand on fermera l'œil droit et que l'on regardera avec l'œil gauche. Le cube est-il tout près des yeux ? le rapport entre les dimensions des deux faces est très-grand ; le cube est-il éloigné ? les deux perspectives sont presque identiques.

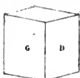


Fig. 633 *b*.

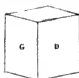


Fig. 633 *a*.

1289. **Principe du stéréoscope.** — Ainsi, le problème à résoudre, pour expliquer comment les deux images formées sur la rétine se fondent l'une dans l'autre et produisent une sensation unique, ce problème est plus complexe que nous ne l'avions laissé supposer tout d'abord : car ce ne sont pas deux impressions identiques qui se combinent pour en former une seule ; mais bien deux impressions différentes, et dont les différences dépendent d'ailleurs de la distance à laquelle les objets sont placés devant nous. Le défaut d'identité de ces deux images avait été déjà remarqué par Léonard de Vinci; mais, depuis longtemps, l'observation qu'il avait faite de ce genre de phénomènes était tombée dans l'oubli. M. Wheatstone eut l'occasion de

faire la même remarque, il y a quelques années ; et cette remarque faite, il en tira parti pour montrer que la vision binoculaire avait, entre autres avantages, celui d'accuser le relief des corps et de nous donner un sentiment plus précis de la distance qui nous sépare de leur position actuelle. Voici de cette assertion une preuve expérimentale très-simple, preuve qui s'obtient sans le moindre instrument. Que l'on regarde avec un œil seulement, un objet placé en avant d'un mur et à une petite distance de sa surface. Au bout d'une à deux minutes, en ouvrant l'œil quon avait jusque-là maintenu fermé, on voit l'objet qui paraissait presque en contact avec le mur s'en détacher tout à coup et comme par enchantement. On a acquis la notion de l'espace libre situé derrière l'objet et celle de la distance qui le sépare du mur.

M. Wheatstone a montré l'importance de la double image, pour donner l'idée du relief, en exécutant des expériences très-curieuses qui sont maintenant connues de tout le monde. Il place devant l'œil droit le dessin d'un cube (*fig.* 633 *a*), dessin qui est la reproduction fidèle de la perspective que ce cube aurait présentée à l'œil droit ; il dispose en même temps devant l'œil gauche et sur le même plan que le précédent, un dessin du même objet qui représente la perspective (*fig.* 633 *b*) qu'aurait vue l'œil gauche. Ces dessins ne sont pas séparés comme sur nos figures, mais ils sont disposés là où ils auraient paru dans l'espace, si l'objet eût existé réellement. Dans ces conditions, au lieu d'apercevoir deux perspectives, on voit un objet unique avec le relief parfaitement accusé.

1289 *bis*. **Stéréoscope.** — L'instrument, qui permet de placer ainsi, sous les yeux d'un observateur, deux perspectives d'un même groupe d'objets, s'appelle le *stéréoscope*. Celui qu'on emploie le plus souvent aujourd'hui, est composé d'une sorte de chambre noire munie de deux fragments de lentilles convergentes L, L' (*fig.* 634 et 635) dont les bords sont dans le voi-

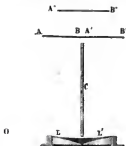


Fig. 634.

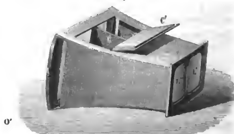


Fig. 635.

sinage l'un de l'autre; ces deux lentilles correspondent chacune à l'un des yeux. A une distance convenable, on dispose les deux perspectives AB, A'B'

tracées sur le papier; alors, par l'effet des lentilles, chacune d'elles se trouve rejetée à la distance de la vision distincte et ramenée sur la ligne centrale de l'appareil, au point où elle eût été, si l'objet lui-même l'avait fournie. Soient en effet O et O' les points où les centres optiques des lentilles se trouveraient si ces lentilles étaient complètes, et supposons que AB et A'B' soient placés entre chaque lentille et son foyer principal. On reconnaitra facilement par ce qui a déjà été établi dans l'étude des lentilles convergentes (1216 *bis*) que les deux images iront se former en A"B".

A tout ce que nous venons de dire et qui constitue l'étude du mécanisme de la vision, nous devons ajouter encore l'indication de quelques phénomènes particuliers, qu'il est important de connaître, quand on se livre à l'étude de certaines parties de l'optique.

1290. **Durée des impressions sur la rétine.** — Le premier que nous signalerons, est celui de la persistance des impressions sur la rétine. Lorsqu'un charbon enflammé décrit une circonférence d'un mouvement assez rapide, une ligne lumineuse non interrompue apparaît à l'œil qui regarde, et cependant, à un instant donné, le charbon ne se trouve qu'en un seul point de cette ligne. On a mesuré la durée de cette persistance par l'emploi d'appareils fondés sur le principe que nous venons d'indiquer. On imprime un mouvement de rotation à une roue qui porte un point lumineux; on fait tourner la roue lentement, et la circonférence décrite par le point lumineux ne brille pas tout entière à la fois. On accélère la vitesse; un arc de cercle de plus en plus grand apparaît éclairé en tous ses points. Enfin, en tournant plus rapidement encore, on arrive à une vitesse de rotation pour laquelle la circonférence se trouve éclairée sur toute sa longueur. Si, à ce moment, la roue fait un tour complet en $\frac{1}{10}$ de seconde, on en conclut que l'impression produite par un point lumineux persiste pendant tout le temps que ce point met à revenir à sa position première, c'est-à-dire que la persistance de l'impression sur la rétine est égale à $\frac{1}{10}$ de seconde.

1291. **Irradiation.** — Lorsque nous regardons un objet lumineux ou très-vivement éclairé, nous le voyons toujours avec un diamètre apparent plus considérable que celui qui lui convient réellement, et cette augmentation de grandeur apparente est d'autant plus forte, que le corps émet une lumière plus intense. C'est ainsi, par exemple, que le disque du soleil nous paraît à l'œil nu beaucoup plus grand que si nous le regardons au travers d'un verre coloré qui en obscurcit en partie la clarté. Une expérience d'irradiation devenue classique est celle qui consiste à regarder deux cercles de carton de diamètres égaux, l'un noir placé sur un fond blanc, l'autre blanc placé sur un fond noir. Le cercle blanc paraît constamment plus grand que le cercle noir; c'est que l'irradiation tend

à augmenter les dimensions du premier et à diminuer celles du second.

Il semble résulter de ces phénomènes d'irradiation, que lorsqu'un rayon lumineux vient frapper la rétine, l'ébranlement qu'il y excite se propage toujours au delà du point touché, de sorte que l'image d'un objet lumineux est toujours perçue plus grande que l'image géométrique qui se forme en réalité sur l'écran placé au fond de l'œil. Il est clair, en outre, que cette propagation de l'ébranlement dans les parties de la rétine voisines de celles qu'atteignent effectivement les rayons lumineux doit ôter de la netteté à la vision : c'est du reste ce que l'expérience confirme.

1292. **Images consécutives.** — Le phénomène des images consécutives ou des couleurs accidentelles consiste essentiellement dans l'observation suivante. Si l'on fixe la vue pendant un temps un peu long sur un objet coloré et vivement éclairé, et qu'ensuite on détourne brusquement les yeux pour les diriger vers un fond blanc d'une teinte uniforme, on éprouve alors la sensation de l'objet avec ses formes véritables, mais il apparaît coloré d'une teinte complémentaire, c'est-à-dire que la nuance qu'il offre, cette fois, est toujours telle que si on la superposait à sa nuance véritable, on obtiendrait du blanc tout à fait pur. C'est ainsi qu'un objet rouge donne une image consécutive verte ; au contraire, un objet de couleur verte donne une image consécutive rouge, etc. L'expérience réussit très-bien avec le disque solaire quand on le regarde à son couchant, et qu'on porte ensuite la vue sur un mur blanc situé dans le voisinage du lieu d'observation.

Les phénomènes d'images consécutives ont été, de la part de M. Plateau, le sujet d'études très-intéressantes ; mais la théorie de ces phénomènes ne nous semble pas assez bien établie pour l'exposer ici.

1293. **Couleurs subjectives.** — L'excitant naturel du nerf optique est la lumière ; mais il ne faudrait pas croire que la lumière seule puisse nous donner la sensation lumineuse ; il existe un grand nombre d'excitants, tels que les narcotiques, l'électricité, les congestions sanguines dans la région des yeux, etc., qui peuvent ébranler la rétine et donner des sensations lumineuses parfaitement accusées. L'explication de ces faits est toute naturelle. Lorsque la lumière vient frapper le nerf optique, ce n'est pas la lumière que nous sentons, mais bien la modification spéciale que notre nerf a subie en vertu de l'action lumineuse ; dès lors on conçoit que d'autres agents puissent imprimer aux fibres nerveuses une modification du même genre, et par suite, nous faire éprouver aussi des sensations du même genre.

1294. **Tutamina oculi.** — On désigne sous ce nom, l'ensemble des organes qui protégent la vue contre les agents extérieurs. Chacun connait à cet égard le rôle des paupières, des cils, etc. Aussi n'insisterons-nous que sur deux propriétés physiques spéciales des milieux protecteurs, propriétés qui garantissent la rétine de l'influence fâcheuse que certains rayon-

nements peuvent exercer sur elle, ainsi : M. J. Regnault a reconnu que les milieux oculaires ont la propriété d'arrêter, au moins en partie, les rayons ultraviolets que peut contenir la lumière qui pénètre dans l'œil. Or, il paraît démontré que ces rayons agissent d'une manière très-nuisible sur la rétine.

M. Janssen (M. Cima, de Turin, avait déjà touché à ce sujet à l'insu de l'auteur français) a constaté par des mesures nombreuses et précises que les milieux de l'œil jouissent encore de la faculté d'arrêter la presque totalité de la chaleur rayonnante obscure qui accompagne toujours la lumière en proportion considérable : cet avantage mérite d'être signalé, car dans le cas, par exemple, de nos lampes modérateur, la proportion des rayons obscurs est beaucoup plus que décuple de celle des rayons lumineux. On comprend donc, qu'en raison de cette propriété la chaleur rayonnante obscure, qui par son pouvoir calorifique pourrait altérer le tissu si délicat de la rétine, soit arrêtée, et que les radiations capables de produire la vision puissent seules être transmises au nerf optique.

CHAPITRE VII

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

1295. Les surfaces réfléchissantes, les milieux réfringents, dont les effets sont intéressants à étudier par eux-mêmes, présentent une importance considérable par les applications qui ont été faites de leurs propriétés. Déjà quelques-unes de ces applications ont été signalées dans l'étude que nous avons faite des miroirs plans, de la chambre noire, du microscope solaire. Cependant jusqu'ici, par la nécessité qu'il y a de commencer toujours par l'examen des cas les plus simples, nous nous sommes bien gardés de composer un appareil où plusieurs éléments optiques fussent combinés, et si un pareil groupement a été quelquefois signalé (comme pour le microscope solaire), c'est qu'en réalité une seule pièce jouait un rôle important, tandis que les autres n'avaient qu'un rôle accessoire, celui d'éclairer l'objet.

Dans les appareils dont la description va suivre, plusieurs des éléments optiques dont la théorie nous est connue vont être assemblés, et si un miroir isolé, si une lentille toute seule peut recevoir des applications importantes, nous verrons qu'une association convenable de lentilles, de miroirs et de prismes peut fournir des effets plus remarquables encore ; ces

ensembles, qu'on appelle *instruments d'optique*, sont destinés pour la plupart à venir au secours de l'œil, à rendre notre vue plus pénétrante ou plus précise, et leur valeur est telle, qu'ils constituent aujourd'hui les auxiliaires indispensables des sciences d'observation : l'astronomie et les sciences naturelles.

Au début, nous décrirons deux instruments assez simples, la chambre claire et la loupe.

1296. **Chambre claire.** — La chambre claire a été inventée en 1804 par Wollaston. Elle se composait d'abord de deux miroirs plans AB et BC (*fig.* 636), faisant entre eux un angle de 135°. Une image de l'objet *ab*, placé devant ce système réfléchissant, se forme d'abord en *a'b'* par la réflexion de la lumière qui tombe sur le miroir BC ; mais *a'b'* joue, par rapport au miroir AB, le rôle d'un objet, et il se forme en *a''b''* une image qui sera visible pour l'œil situé au-dessus de AB. Si l'objet est vertical, l'image paraîtra horizontale et droite à l'observateur : cela tient à ce que tout rayon qui se réfléchit sur deux miroirs faisant un angle, se brise en faisant avec sa direction primitive un angle double de celui que font les deux miroirs : le lecteur trouvera sans peine la démonstration. Wollaston prenait pour ce dernier miroir AB une lame de verre non étamée ; en même temps que l'image *a''b''*, il pouvait donc apercevoir une feuille de papier placée à la distance de la vision distincte, et avec un crayon, il pouvait suivre les l'image et les dessiner.

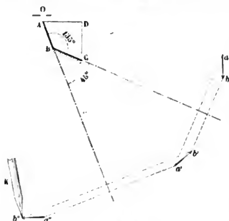


Fig. 636.

Mais un pareil système laissait perdre une grande quantité de lumière, et l'image *a''b''* était trop peu intense ; Wollaston le remplaça par un prisme de verre à quatre faces ABCD, tel que l'angle D fût droit, et les angles A et C égaux. Les rayons arrivent sur BC et sur AB sous l'angle de réflexion totale, et les images acquièrent alors une grande vivacité. Mais, dans ce cas, l'œil placé au-dessus de AB ne peut plus voir ni le papier ni le crayon, qui se trouvent cachés par le prisme. On est dans la nécessité de placer l'œil en O, dans une position telle que l'ouverture de la pupille soit au bord d'une arête du prisme, et puisse laisser pénétrer, à la fois, jusqu'à la rétine la lumière directe qu'envoie le papier et la lumière réfléchie qui produit l'image. Afin

que l'œil prenne une bonne position, la face AD est recouverte d'une plaque qui est percée d'un petit trou divisé en deux parties par l'arête A du prisme.

Nous avons admis que les rayons qui émanaient des différents points de l'objet éclairé tombaient sur les surfaces réfléchissantes, comme dans le cas où la chambre claire était formée seulement des deux miroirs AB et BC : cependant la lumière, en pénétrant dans le prisme ou en s'en échappant, se réfracte, les deux réfractions ainsi produites n'amèneront-elles pas quelque déviation capable de troubler le phénomène ? Ce danger n'est pas à craindre. La lumière subit deux réfractions successives, cela est vrai, mais toutes deux se compensent, comme elles le font dans le cas où les rayons traversent une lame à faces parallèles. Le calcul peut le démontrer : nous donnerons simplement la figure ci-jointe (*fig.* 637) qui montre que le rayon émergent *ik* est toujours perpendiculaire au rayon incident *ef*. Nous laisserons au lecteur le soin de la démonstration qui est aisée.

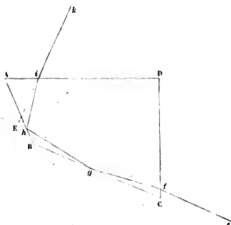


Fig. 637.

Cet ensemble de deux miroirs présente pour le dessin des paysages ou des monuments, des avantages précieux. Son champ est illimité dans le sens vertical. En effet, que l'on fasse tourner le système des deux miroirs autour de leur intersection commune, l'image restera immobile, et quelle que soit la hauteur des objets, la chambre claire la plus petite permettra de les dessiner dans toute leur étendue.

Cet instrument présente un autre avantage très-important pour les dessinateurs, c'est qu'il donne les images sans aucune *déformation* de la perspective.

1297. **Perfectionnement de la chambre claire.** — Une chambre claire aussi simple que celle que nous avons décrite, exige, de la part du dessinateur, un effort d'accommodation impossible à réaliser. Le papier et le crayon étant placés à la distance de la vision distincte, l'œil, pour les voir, doit s'accommoder à cette distance, et, d'autre part, l'image de l'objet à dessiner se formant derrière la face réfléchissante AB, à la distance même

où il se trouve, l'œil doit s'accommoder en même temps pour voir à une grande distance si cet l'objet est éloigné. Ce sont deux états que le même œil ne peut réaliser à la fois, et une lutte s'établit entre les deux tendances à ces accommodations souvent très-différentes; l'observateur, passant sans cesse de l'une à l'autre, ne tarde pas à éprouver une fatigue considérable.

Un autre défaut de cette chambre, c'est que si le prisme peut tourner sans inconvénient, les déplacements de l'œil sont, au contraire, très-fâcheux : ils changent la position relative de l'image et du papier, et ce changement est tout à fait comparable à celui qui se manifeste, lorsque nous regardons en marchant deux objets inégalement distants de notre vue.

Déjà, pour remédier à ces défauts, Wollaston avait adapté une lentille divergente au-dessus de la face AD, et il la construisait de telle sorte qu'elle fît apparaître les objets éloignés juste à la distance de la vision distincte; à travers cette lentille, le dessinateur regarde l'image donnée par le miroir AB, et il la voit à la même distance que le papier. Il n'a pas à lutter pour réaliser une accommodation impossible. Cette lentille pourrait être formée par un verre plan concave placé sur la face AB; mais il vaut mieux qu'elle fasse corps avec la chambre claire, qui présente alors une disposition analogue à celle que nous avons figurée ici (*fig.* 638). Par ce perfectionnement, on évite en outre l'erreur due aux petits déplacements de l'œil, puisque l'image et le papier sont exactement en coïncidence. Le spectateur a beau se déplacer, il ne peut pas les voir changer dans leurs positions relatives.

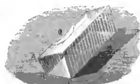


Fig. 638.

1297 *bis*. **Nouveau perfectionnement.** — La position du centre optique de la lentille divergente est importante à considérer dans l'instrument que nous étudions, et cependant Wollaston ne s'en était point préoccupé. M. Laussedat, voulant utiliser la chambre claire pour le lever des plans, et ayant besoin de retrouver facilement ce point sur le prisme, « l'a transporté sur l'arête près de laquelle on place l'œil, en prenant le centre de la sphère qui entaille la face du prisme sur une perpendiculaire à cette face menée par un point de l'arête elle-même. » La figure 638 montre la chambre claire de M. Laussedat; seulement l'entaille du prisme a été exagérée pour qu'elle soit sensible.

Les avantages de cette construction résultent de ce que l'œil qui regarde est placé sur l'axe principal de la lentille, et la vision est dès lors très-distincte. Mais le principal avantage, c'est que lorsque l'on dessine une perspective, « le centre optique de l'appareil peut être considéré comme

« le point de vue *mathématique* de la perspective. » Par conséquent, dès qu'on sera sûr que les angles du prisme ont exactement la grandeur voulue, la verticale PP' (*fig.* 639) menée par le centre optique rencontrera sur le dessin le point même qu'aurait rencontré sur le paysage l'horizontale HH'

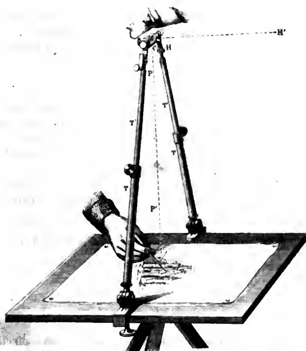


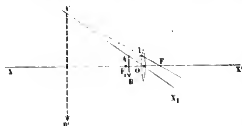
Fig. 639.

menée par le même point, dans un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme.

1298. **Loupe.** — La loupe est le plus simple des instruments d'optique : elle se compose d'une lentille convergente à travers laquelle on regarde un objet placé à une distance de la lentille un peu moindre que la distance focale principale.

A vrai dire, la théorie de la loupe a déjà été donnée ; elle rentre, comme cas particulier, dans l'étude générale des lentilles convergentes. Nous avons montré, § **1216** *bis*, que l'image de l'objet AB était virtuelle et plus grande que l'objet, toutes les fois que cet objet était placé entre la lentille et le foyer principal, l'œil placé derrière la loupe aperçoit alors l'image en A'B'. Mais, pour que la perception soit nette, il faut que la distance de

cette image à l'œil soit celle de la vision distincte. L'observateur qui se sert de cet instrument arrive, en tâtonnant, à réaliser cette condition pratique. A cet effet, il avance ou il recule l'objet, ce qui déplace progressivement l'image dans un sens ou dans l'autre, et enfin, il parvient à mettre l'objet *au point*.


Fig. 640.

Les services, que rend la loupe, sont bien connus : elle permet d'apercevoir dans cette image agrandie les détails des objets dont la petitesse échapperait à notre vue ; et jusque dans les premières années de ce siècle, c'est avec cet appareil simple qu'ont été exécutés les travaux des naturalistes.

1299. On peut se demander quel est le grossissement d'une loupe : il suffit pour résoudre la question de recourir à la formule déjà employée (**1217**) $\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}$ dans laquelle p' est donné d'avance : c'est, en valeur absolue, la distance D de la vision distincte, tandis que p est inconnu et se déduit de l'égalité : $\frac{1}{p} - \frac{1}{D} = \frac{1}{f}$, d'où $p = \frac{Df}{D+f}$, d'où le grossissement :

$$G = \frac{p'}{p} = \frac{D+f}{f} = 1 + \frac{D}{f}$$

Le grossissement augmente avec la distance de la vision distincte, il diminue à mesure que la distance focale de la lentille devient plus grande.

MICROSCOPE COMPOSÉ

1300. Théorie du microscope composé. — Le microscope composé est un instrument qui donne les images agrandies des objets de petites dimensions, et les présente à la distance de la vision distincte. Son but, on le voit, est le même que celui de la loupe ; mais ses effets sont plus puissants. Dans cet instrument, en effet, l'œil regarde à travers une lentille convergente appelée oculaire, qui sert de loupe ; mais ce qu'il regarde, ce n'est pas le petit objet lui-même, c'est une image déjà agrandie au moyen d'une première lentille convergente, qui a le nom d'objectif. Les objets sont donc amplifiés par un double système de lentilles. Au grossissement de la loupe se trouve ajouté celui de l'objectif.

La figure 641 représente l'objectif L, et ses deux foyers F, F_1 ; l'oculaire L' et ses foyers F', F'_1. L'objet AB, un peu au delà du foyer F_1, mais à une

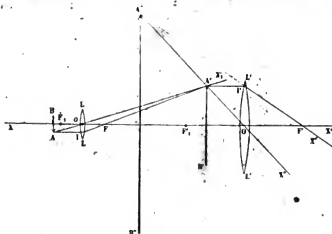


Fig. 641.

distance de la lentille moindre que le double de la distance focale principale, donne une image réelle et renversée qui se détermine, suivant les règles établies dans la théorie des lentilles. Veut-on l'obtenir par un tracé géométrique? on mène l'axe secondaire AX'_1 du point A, puis le rayon AI parallèle à l'axe principal, et le rayon réfracté correspondant IF, qui vient couper l'axe secondaire au point A'; ainsi, on a en A' l'image de A. On tracerait de même l'image B' du point B, et l'on voit que, devant la loupe L', il se forme l'image A'B' agrandie et renversée de l'objet. Pour que la lentille L' joue le rôle de loupe, il faut que cette image A'B' se forme entre la lentille L' et le foyer F'_1 ; c'est ce que la figure représente. En traçant l'axe secondaire A'X", puis le rayon parallèle à l'axe XX', et enfin le rayon réfracté I'F', on obtient, par le prolongement de ce dernier, l'image virtuelle A" du point A', et par suite l'image A"B" qui est plus grande que A'B' renversée comme elle, et qui, par une position convenable donnée à l'oculaire, se trouve rejetée à la distance de la vision distincte.

1301. **Diverses pièces d'un microscope.** — L'objectif et l'oculaire sont les deux pièces essentielles du microscope, mais l'instrument exige des accessoires. Ce sont (*fig.* 642), 1° les tubes qui portent les lentilles, 2° la plate-forme P, destinée à soutenir l'objet, 3° un système d'éclairage M qui rend l'objet très-lumineux, enfin, 4° le pied S de l'instrument, sur lequel toutes les pièces sont fixées.

Tubes. — Les tuyaux qui portent les lentilles s'emboîtent l'un dans l'autre. Au bout du tuyau inférieur T est enchâssé l'objectif L (*fig.* 641) et

au bout opposé du tuyau supérieur est fixé l'oculaire L'. Ces deux verres sont écartés à volonté, en faisant glisser les tuyaux l'un dans l'autre ; mais le plus souvent l'observateur les laisse à une distance fixe.

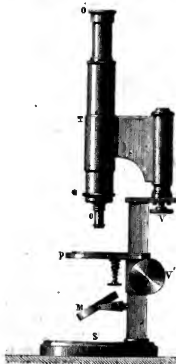


Fig. 642.

Porte-objet. — Une plate-forme P, percée d'une ouverture qui peut être diminuée ou agrandie par l'emploi de diaphragmes, sert à supporter les corps très-petits que l'on veut étudier ; on l'appelle le *porte-objet*. Des ressorts sont destinés à retenir les lames de verre sur lesquelles, en général, ces corps sont déposés. Une tige à crémaillère permet, au moyen d'une tête de vis V', d'approcher ou d'éloigner la plate-forme de l'objectif afin d'effectuer aisément la *mise au foyer*. Par le moyen d'une vis V à mouvement doux, on peut élever ou abaisser l'instrument, et l'on achève alors facilement la mise au foyer.

Éclairage. — La substance placée sur le support ne serait pas visible, si elle n'était pas fortement éclairée. Le plus généralement, elle est transparente, on doit alors l'éclairer par-dessous. On emploie à cet effet un miroir concave M qui accumule sur elle les rayons lumineux qui proviennent, soit des nuées, soit d'une lampe. Quand l'objet que l'on veut étudier n'est pas transparent, il faut en éclairer la face supérieure. On se sert alors d'une lentille convergente, soutenue par un système de tiges articulées qui permet toute espèce de mouvements. On a, par ce moyen, la faculté de concentrer la lumière sur la face de l'objet que l'on veut explorer (*).

1302. **Mode d'observation.** — Veut-on faire une observation avec le microscope ? on met l'œil à l'oculaire, en O', on tourne l'instrument de telle manière qu'il reçoive, dans la direction de son axe, les rayons lumineux renvoyés par le miroir M. L'œil reconnaît que cette condition est réalisée lorsqu'il aperçoit, dans le champ de l'instrument, une surface unifor-

(*) Le microscope représenté ici est celui que construit M. Hartnack, successeur d'Oberhauser.

mément éclairée. L'objet est alors placé sur la plate-forme, que l'on fait monter ou descendre, jusqu'à ce que l'on aperçoive l'image le plus distinctement possible. Quant à l'oculaire, on fait varier une fois pour toutes sa distance à l'objectif, de façon à obtenir le maximum de netteté avec un grossissement déterminé.

1303. **Microscope horizontal.** — Les naturalistes observent souvent pendant plusieurs heures de suite, et le microscope qui les oblige à tenir la tête inclinée, pendant toute la durée des observations, occasionne une grande fatigue qu'Amici a cherché à leur éviter. Dans le microscope d'Amici, l'observateur regarde à travers un tuyau horizontal, en tenant la tête dans la position ordinaire, et cependant le porte-objet reste aussi horizontal. A cet effet, le tube qui porte l'objectif est recourbé à l'angle droit, et l'axe principal de l'oculaire se trouve horizontal. Au coude, est disposé un prisme de verre à réflexion totale semblable à celui que nous avons déjà décrit (1201); ce prisme renvoie à l'oculaire les rayons qui ont traversé l'objectif et présente alors à l'observateur les images renversées des objets qui se projettent sur un plan vertical placé à la distance de la vision distincte.

1304. **Grossissement.** — Le grossissement du microscope est le rapport de la grandeur de l'image A″B″, à celle de l'objet AB. Si l'une des dimensions de A″B″ est égale à 100 fois la dimension homologue de AB, on dit que le grossissement du microscope en diamètre est égal à 100: le grossissement est ainsi compté en comparant une dimension de l'image à la dimension correspondante de l'objet. Le grossissement en surface est, d'après cela, le carré du précédent. Dans l'exemple choisi, où le grossissement en diamètre a été supposé égal à 100, le grossissement en surface serait de 10000.

Les calculs des lentilles s'appliquent au cas actuel, et permettent la détermination du rapport $\frac{A''B''}{AB}$, qui donne la mesure de la grandeur relative de l'image de l'objet. Il suffit d'évaluer successivement le grossissement dû à l'objectif, puis celui qui appartient à l'oculaire, et pour cela, il n'y a qu'à répéter les calculs qui se rapportent à une lentille convergente donnant l'image réelle d'un objet situé au delà du foyer principal, puis ceux qui concernent la loupe.

Le rapport $\frac{A'B'}{AB}$ est le grossissement de l'objectif; $\frac{A''B''}{A'B'}$ est le grossissement de l'oculaire; le produit de ces deux quotients $\frac{A''B''}{AB}$ est précisément le grossissement du microscope. Or, nous avons démontré que $\frac{A'B'}{AB}=\frac{p'}{p}=\frac{f}{p-f}$; p étant la distance actuelle, qu'on suppose connue, de l'objet à la lentille objective, et f la distance focale principale de cette dernière. Semblablement,

le rapport $\frac{A''B''}{A'B'}$ qui se rapporte à la loupe a été trouvé égal à $\frac{D+f}{f}$, D étant, la distance de la vision distincte de l'observateur, et f' la distance focale principale de la loupe. Donc, dans le microscope composé, le grossissement $\frac{1}{\Omega}=\frac{f'(D+f')}{f'(p-f)}$. On voit donc que le grossissement pour un même instrument dépend de la distance p de l'objet à la lentille objective, et de la distance D de la vision distincte de celui qui fait l'observation.

1305. **Méthode expérimentale.** — La méthode par le calcul n'est pas celle que l'on préfère ; elle exigerait des mesures très-longues : les déterminations exactes de p, de f et de f', déterminations qu'il ne serait guère facile d'obtenir avec quelque précision. On a plus d'exactitude, et l'on arrive plus vite au but, par une méthode expérimentale directe. Cette méthode consiste à regarder à travers le microscope, un objet de dimension connue, et à comparer la grandeur de l'image que l'on aperçoit à celle de l'objet lui-même. Une chambre claire est disposée en avant de l'oculaire, elle donne à l'œil placé de côté, l'image de l'objet situé sur la plate-forme. Cette image est celle qui serait aperçue si on regardait directement dans le microscope ; mais elle apparaît comme projetée sur un plan vertical quand on adopte la disposition du microscope indiquée au paragraphe 1301. L'objet mis en observation est une lame de verre nommée *micromètre* sur laquelle sont tracés des traits très-fins également espacés et distants, en général, d'un centième de millimètre. Ce que l'œil aperçoit, ce sont ces centièmes de millimètre tels que le microscope les grossit. Mais l'œil est placé au bord de la chambre claire, il distingue en même temps un écran vertical placé à la distance de la vision distincte, sur lequel les divisions grossies du micromètre semblent être dessinées. Avec un compas, on prend l'intervalle d'un certain nombre de ces divisions : 10, par exemple. On porte le compas, sans en changer l'ouverture, sur une règle partagée en millimètres; il comprend, je suppose, entre ses pointes, une longueur de 25 millimètres. Cette opération donne le grossissement. En effet, 10 centièmes de millimètre paraissent à l'œil, qui regarde dans le microscope, occuper une longueur de 25 millimètres, un millimètre semblera occuper 10 fois 25 millimètres ou 250 millimètres. Le grossissement est donc égal à 250 en diamètre.

1306. **Autre méthode.** — La chambre claire n'est pas indispensable pour la détermination précédente. Que l'observateur regarde dans le microscope avec l'œil droit, par exemple, il voit une image, qui semble à l'œil beaucoup plus large que le tuyau de l'instrument. L'œil gauche qui est alors ouvert aperçoit une feuille de papier placée à la distance de la vision distincte. Les deux yeux transmettent ainsi à la fois des impressions différentes : les deux sensations perçues à droite et à gauche se confondent,

et les divisions qui sont aperçues par l'œil droit semblent tracées sur la feuille de papier. Avec un compas, on prend 10 de ces divisions et l'on achève l'opération comme dans la première méthode.

1307. **Achromatisme.** — L'image formée par une lentille, est colorée des couleurs du spectre, à cause de la décomposition de la lumière qui s'opère en même temps que la réfraction, par suite de l'inégale réfrangibilité des rayons de différentes couleurs. L'objet AB (*fig.* 643) est-il blanc, il se forme derrière l'objectif, une série d'images qui sont toutes comprises entre les axes secondaires extrêmes et qui par conséquent sous-tendent un même angle ayant pour sommet le centre optique de la lentille. La plus petite est l'image violette V, et la plus grande l'image rouge R. L'œil regardant ces images d'inégal diamètre avec une loupe, verra les bords colorés en rouge, et il n'y aura pas que les bords extrêmes qui présenteront cette coloration; toutes les lignes brillantes de l'objet seront irisées, et dès lors la netteté sera enlevée aux images. Ce défaut a été corrigé par une lentille L″, qui offre, en outre, l'avantage d'augmenter l'étendue visible : ce qu'on appelle le champ de l'instrument. Elle est disposée entre l'objectif et les images qu'il doit former.

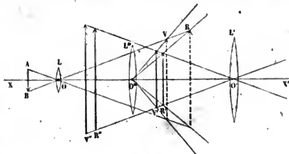


Fig. 643.

L'effet de cette lentille peut être rendu manifeste par des constructions géométriques. Par le fait de son introduction dans l'instrument, des images autres que R et V se formeront et leurs bords seront sur les axes secondaires passant par O″, centre optique de la *lentille de champ*. La nouvelle image rouge doit être comprise entre les axes secondaires O″R, l'image violette entre les axes O″V. Le cône, formé par les axes secondaires correspondant au violet, enveloppe, comme on le voit, le cône correspondant aux axes secondaires des rayons rouges. On conçoit donc qu'en choisissant convenablement les rayons de courbure et l'indice de réfraction de la lentille, on puisse obtenir à la place des images R et V, deux images nouvelles R′ et V′, telles que l'image rouge soit plus petite que l'image violette. Si l'on joint alors par une droite les points V′, R′, et si à l'endroit même où ces lignes rencontrent l'axe de l'instrument, on met le centre optique O′ d'une loupe, on apercevra les extrémités V′ et R′ placées sur une

même ligne droite. Les rayons des couleurs extrêmes qui appartiennent au même point arriveront alors à l'œil en formant des faisceaux dont les axes se confondront. Ces rayons devront se superposer, et l'image ne semblera pas colorée sur ses bords.

La construction des microscopes a fait, dans ces dernières années, de grands progrès. Aujourd'hui, on rend à la fois achromatiques, l'oculaire et l'objectif. Celui-ci est, en général, composé de plusieurs petites lentilles qui se vissent l'une au-dessous de l'autre à une même monture; ces lentilles diffèrent l'une de l'autre par la grandeur de leur distance focale principale; on peut par leur introduction ou leur suppression faire varier, à volonté, le grossissement de l'instrument.

1308. Champ de l'instrument. — Cette lentille O″, dont nous venons de faire comprendre l'importance, a un autre avantage, elle augmente le champ de l'instrument, et ce résultat est très-important; sans elle, le champ se trouverait beaucoup trop restreint. Considérons, en effet, l'image rouge du point A (*fig.* **644**), et déterminons quel est le faisceau des rayons qui forment cette image. Ce faisceau est très-délié : les rayons extrêmes AL, qui frappent la lentille L viennent au point R, et les rayons convergents sont tous compris dans le cône LRL. Il n'arrive pas au point R un seul rayon qui soit en dehors de ces limites, et elles sont

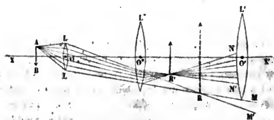


Fig. 644.

étroites, car l'objectif est de très-petite dimension. Les rayons divergent à partir de R, et forment un cône étroit MRM′ de rayons divergents qui s'écartent de l'axe de l'instrument. Il faudrait que la loupe fût d'une grande étendue pour qu'un grand nombre de faisceaux vinssent la traverser, et la pupille devrait être d'une très-grande largeur pour recevoir à la fois ces divers faisceaux. La lentille de champ les ramène vers l'axe de l'instrument et force un plus grand nombre d'entre eux à traverser la loupe, et à parvenir ensuite à l'œil. On voit comment le faisceau MRM′ se convertit en NRN′.

LUNETTE ASTRONOMIQUE.

1309. Théorie de la lunette. — La lunette astronomique est un instrument qui a pour effet de fournir à l'observateur une image des objets éloignés. Cette image se forme à la distance de la vision distincte; ce qui en rend les contours très-nettement définis. En outre, quand les objets ont

des dimensions sensibles (le soleil, la lune, les planètes), leur image se montre à l'observateur avec un diamètre apparent plus grand que lorsqu'il les regarde à l'œil nu. Ainsi, grâce à la lunette astronomique, l'astre sous-tend pour l'œil un angle plus ouvert, et l'instrument nous place dans les mêmes conditions que si cet astre s'était rapproché de nous.

La lunette astronomique se compose essentiellement de deux lentilles convergentes. La première lentille, l'objectif L, donne de l'objet une image très-petite et très-brillante, qui, à cause du grand éloiguement de l'objet, se forme à son foyer principal, et la seconde, l'oculaire, joue le rôle d'une véritable loupe qui sert à regarder la petite image formée.

Un tracé géométrique rend compte des effets observés. Soit AB (*fig.* 645), un objet très-éloigné, beaucoup plus éloigné qu'il n'est possible de le figu-

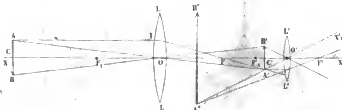


Fig. 645.

rer; soient L la lentille objective, F son foyer. L'image du point A se trouve en menant la ligne AO passant par le centre optique; puis on trace le rayon AI parallèle à l'axe principal; ce rayon après sa réfraction passe au point F et coupe AO en A′; A′ est l'image du point A. Ce point A′ est très-près de l'axe principal XX′, parce que l'objet, quelque considérables que soient ses dimensions, est toujours d'une grandeur extrêmement faible, par rapport à la distance d'où il est observé. On trace l'image qui est vue à travers la loupe, en suivant la méthode ordinaire. L'image A″B″ est celle que l'observateur aperçoit en plaçant l'œil derrière O′ (*).

1310. **Dispositif.** — Les lentilles sont aux extrémités d'une série de tuyaux qui s'emboîtent les uns dans les autres. L'objectif L (*fig.* 646), de grandes dimensions, est au bout d'un premier tuyau très-large; l'oculaire L′, de dimensions plus petites, est fixé à l'extrémité du dernier tuyau qui est relativement étroit. L'observateur ayant dirigé la lunette vers l'objet, enfonce ou retire le tube qui porte l'oculaire, jusqu'à ce que l'image lui présente le maximum de netteté. Une crémaillère est souvent employée pour permettre d'exécuter la mise au point, d'une manière progressive et sans secousse brus-

(*) La figure 645 se rapporte au cas où l'objet AB est à une distance de L non infiniment grande. S'il en est autrement, chaque point de l'objet envoie sur la lentille L des faisceaux de rayons parallèles entre eux et à l'axe secondaire passant par ce point.

que. Une différence essentielle entre l'emploi de la lunette astronomique et celui du microscope doit être dès à présent remarquée. Pour observer avec le microscope, on déplace l'objet en soulevant ou en abaissant le porte-objet ; et le déplacement de l'oculaire ne joue qu'un rôle secondaire. Pour mettre au point la lunette astronomique, c'est le déplacement de l'oculaire qui joue le rôle important ; on en conçoit bien la raison : l'observateur n'est pas maître de déplacer les corps éloignés, il n'a d'autre ressource que celle de changer la distance relative des verres à travers lesquels cheminent les faisceaux lumineux envoyés par ces corps.



Fig. 646.

1311. Grossissement. — On appelle grossissement d'une lunette astronomique le rapport qui existe entre l'angle sous lequel l'observateur voit l'image A″B″, et l'angle sous lequel il verrait l'objet AB à l'œil nu. Dans le cas de la figure 645, le grossissement sera exprimé par $\frac{A''O'B''}{AOB}$ ou bien par $\frac{A'O'B'}{A'OB'}$. Pour trouver le rapport de ces angles, il suffit de déterminer le rapport des arcs qui, étant décrits du sommet comme centre, avec l'unité comme rayon, seraient compris entre les côtés. Or, ces angles sont toujours assez petits pour que l'on puisse approximativement prendre les cordes pour les arcs. L'angle A'O'B', qui comprend entre ses côtés l'arc A'B' décrit avec un rayon A'O', comprendrait un arc $\frac{A'B'}{A'O'}$, s'il était au centre d'un cercle de rayon 1 ; de même la mesure de l'angle A'OB' est $\frac{A'B'}{A'O}$. Le rapport de ces angles est donc $\frac{A'B'}{A'O'} : \frac{A'B'}{A'O} = \frac{A'O}{A'O'}$. Or, ce rapport $\frac{A'O}{A'O'}$ est approximativement égal à $\frac{F}{f}$, F et f étant les distances focales de l'objectif et de l'oculaire.

Cette formule montre qu'une lunette donne un grossissement d'autant plus considérable que la distance focale de l'objectif est plus grande et que celle de l'oculaire est plus petite. Cette observation est mise à profit dans la pratique.

1312. **Mesure du grossissement.** — En fait, la formule qui a été trouvée ne donne le grossissement qu'avec une approximation assez grossière. Si l'on veut l'obtenir exactement, il vaut mieux opérer d'une manière directe, en comparant par un procédé expérimental, l'angle sous lequel on voit un objet dans la lunette à l'angle sous lequel on le verrait à l'œil nu. La méthode la plus simple est analogue à celle qui a été employée pour le microscope. On se sert d'une règle verticale divisée qui est située à une grande distance, à 300 mètres par exemple; on la regarde à l'œil nu; à cette distance de 300 mètres, chaque partie de la règle est vue avec un diamètre apparent beaucoup plus petit que si elle était placée à la distance de la vision distincte, qui est égale, comme nous le savons, à 30 centimètres. Comme ce nombre 300 mètres est égal à 1000 fois 30 centimètres, l'angle sous lequel on apercevra chaque division de la règle sera 1000 fois plus petit que si cette règle était à la distance de la vision distincte, et une longueur de 1 mètre ne semblera pas plus grande qu'une longueur de 1 millimètre qui serait placée à 30 centimètres de l'œil.

Cette règle A est regardée à travers la lunette par l'œil droit. Vis-à-vis l'œil gauche, on fixe une seconde règle B placée à la distance de la vision distincte; les traits de l'image aperçue dans le champ de la lunette semblent se dessiner sur la règle qui est regardée directement, et l'on trouve, par exemple, qu'une longueur de 1 mètre appartenant à la règle A occupe une longueur de 70 millimètres sur la règle B. L'objet, par le fait de la lunette, est donc rendu visible à l'observateur sous un angle 70 fois plus grand. Le grossissement de l'instrument est égal à 70.

1313. **Champ.** — Le champ de la lunette correspond à l'espace qui est rendu visible par l'emploi de l'instrument. Il est déterminé par l'ensemble des faisceaux qui, traversant l'objectif, peuvent passer à travers l'oculaire et arriver enfin jusqu'à l'œil. Pour exécuter cette détermination, il faut suivre la marche des rayons partis d'un point A quelconque placé devant l'objectif, et voir à quelles conditions ils émergeront, en totalité ou en partie, à travers l'oculaire.

Les rayons qu'un point A (*fig.* 647) envoie à l'objectif sont tous compris

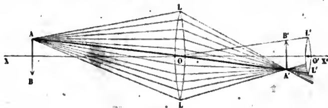


Fig. 647.

dans le cône dont A est le sommet et dont la surface de la lentille L forme

la base. Après la réfraction, ces rayons forment un cône convergent vers A'; puis, les rayons s'écartent en divergeant. Si les rayons de ce cône tombent tous sur l'oculaire, il est évident que le point lumineux sera visible; si aucun d'eux n'y parvient, ou s'il n'en arrive qu'un nombre trop petit pour produire un éclat suffisant, le point A ne pourra pas être aperçu. On admet un peu arbitrairement, mais avec une approximation convenable, qu'un faisceau est visible quand son axe touche le bord de l'oculaire. L'axe de ce cône, c'est ce qu'il importe le plus de remarquer, n'est autre chose que l'axe secondaire AA' du point A; et en résumé, les axes secondaires tels que AOA', constitués par des lignes qui vont du centre optique de l'objectif aux bords de l'oculaire L' limiteront l'espace visible. L'on pourra dire, par conséquent, que celui-ci est renfermé tout entier dans un cône ayant pour base le grand cercle de l'oculaire et pour sommet le centre optique de l'objectif. L'angle L'OL' servira donc de mesure au champ de la lunette. L'oculaire est toujours de petite dimension; L'L' pourra être pris pour l'arc décrit du point O comme centre avec la distance des deux lentilles $F+f$ comme rayon. La valeur de cet angle pourra donc être considérée comme égale à $\frac{D}{F+f}$, D désignant le diamètre de l'oculaire.

1314. **Détermination expérimentale.** — Mais ce calcul, qui n'est qu'approximatif, ne peut donner qu'une première *indication* sur la grandeur du champ; il fait voir de quelles quantités elle dépend, mais il vaut mieux, dans tous les cas, la déterminer directement par l'expérience. A cet effet, une règle divisée est placée à une distance assez grande, 500 mètres par exemple; on regarde l'étendue de la règle visible à travers la lunette, et on divise cette étendue par la distance. On a ainsi la longueur de l'arc qui mesure l'angle du champ, et le nombre de degrés de cet arc donne l'angle cherché. Cette méthode a l'avantage de permettre l'étude des diverses parties du champ réel. En se guidant d'après la netteté de l'image observée, on note quelles sont les parties du champ où ces images sont bonnes et celles où elles sont médiocres. Dès lors, la valeur optique de l'instrument peut être appréciée, en parfaite connaissance de cause.

1315. **Axe optique.** — La lunette astronomique a pour but de permettre à l'observateur d'apercevoir plus nettement les détails des objets qu'il étudie; elle met l'astronome en rapport plus direct avec les astres éloignés, elle lui donne la faculté d'acquérir quelques notions précises sur leur constitution, sur les changements qui s'y opèrent, et enfin de découvrir des mondes que la sensibilité très-restreinte de notre œil n'eût jamais permis d'apercevoir dans les profondeurs du ciel. Mais elle a un autre usage, on pourrait presque dire plus important que le premier; elle rend d'immenses services par l'exactitude très-grande avec laquelle elle donne

la mesure des angles. Pour satisfaire à cette nouvelle destination, elle porte un *réticule* au foyer de son oculaire; ce réticule, dans sa plus grande simplicité, consiste en deux fils d'une finesse excessive croisés à angle droit et formant un plan perpendiculaire à l'axe de la lunette. La ligne qui joint le *point de croisée* des fils au centre optique de l'objectif porte le nom d'axe optique de la lunette; cette ligne prolongée indéfiniment au delà de la lunette, suit l'axe principal ou bien un axe secondaire très-voisin du premier et rencontre tous les points qui font leur image à la croisée des fils. Cette image regardée à travers l'oculaire se confondra avec ce point de croisement. Une ligne fixe est donc déterminée dans l'instrument, pourvu toutefois que l'on ait soin, dans le cours d'une série d'observations, de ne pas toucher au réticule. L'angle dont il faut faire tourner la lunette pour apercevoir successivement deux points éloignés, est précisément l'angle sous-tendu par la ligne qui joint ces deux points. Le grossissement de la lunette permet d'ailleurs de diriger avec précision l'axe optique vers l'un ou l'autre de ces points.

1316. **Achromatisme.** — Un observateur qui n'aurait à sa disposition qu'une lunette astronomique à deux verres verrait toutes les lignes lumineuses sous la forme de bandes colorées; il est donc indispensable d'achromatiser l'instrument. On y parvient, en achromatisant à la fois, l'objectif et l'oculaire. L'objectif se compose de deux lentilles, l'une biconvexe et formée de crown-glass, l'autre biconcave ou concave-convexe et formée de flint-glass. Le système de ces deux lentilles n'est qu'imparfaitement achromatique; on complète l'achromatisme de la lunette en modifiant convenablement l'oculaire. L'oculaire d'Huyghens, *oculaire négatif*, qui a été donné déjà, à propos du microscope, convient très-bien, il corrige en même temps et les effets nuisibles de coloration et les aberrations de sphéricité. Il est excellent, lorsqu'il ne s'agit d'employer la lunette que pour présenter aux yeux les détails d'un objet éloigné, et lorsque l'on ne tient pas à mesurer des angles. Mais, si la lunette devait satisfaire à cette dernière destination, l'oculaire d'Huyghens serait d'un très-mauvais usage. Dans ce cas, en effet, comme il est nécessaire que l'œil aperçoive le réticule superposé à l'image, il faut que le réticule et l'image grossis par la loupe L' soient placés à la même distance de cette dernière. Or, cela n'est possible avec l'oculaire d'Huyghens que si le réticule est placé entre les deux lentilles qui composent l'oculaire. Mais, d'autre part, l'oculaire est déplacé quand on l'ajuste pour voir nettement les images, et le point de croisée du réticule, en raison de ce déplacement, est exposé à des mouvements ayant lieu à droite et à gauche de l'axe optique primitif : l'instrument ainsi construit ne donnerait donc pas un axe optique absolument fixe : il serait impossible de se fier à ses indications.

Ramsden a construit un oculaire, dit *oculaire positif*, qui peut se placer

en avant du réticule, et dont l'achromatisme se fait par les mêmes principes qui ont servi à établir celui de l'oculaire d'Huyghens (1307).

1317. **Clarté des images.**— La lumière reçue par l'objectif de la lunette et qui forme devant l'œil l'image agrandie d'un corps lumineux, se trouve disséminée sur toute la surface de cette image, et celle-ci devra, par suite, se trouver d'autant plus pâle qu'elle sera plus étendue. Mais la clarté de l'image est, d'autre part, augmentée par les grandes dimensions de l'objectif qui recueille une quantité de lumière d'autant plus considérable que son diamètre est plus grand ; toutefois, de ces deux effets, celui du grossissement qui pâlit l'image est plus puissant dans la plupart des lunettes que l'effet dû aux grandes dimensions de l'objectif pour aviver la clarté. Une lunette de moyenne grandeur (celle que nous avons à notre disposition, par exemple) grossit-elle 70 fois en diamètre, son grossissement en surface est $(70)^2$ ou 4900. Toute la lumière qui frappe l'objectif est comme étalée sur 4900 surfaces égales à celle que semble avoir l'objet vu directement à l'œil nu. Si donc les dimensions de l'objectif n'étaient autres que celles de la pupille, la clarté de chaque partie de l'objet serait réduite à $\frac{1}{4900}$, et encore faudrait-il, dans le calcul, admettre qu'il n'y a aucune perte de lumière par l'action absorbante des lentilles placées sur le trajet des rayons lumineux. Mais la lunette qui est entre nos mains a un objectif d'une étendue égale à 625 fois celle de la pupille, ce qui rend l'image 625 fois plus brillante ; son intensité est donc $\frac{625}{4900}$ de ce qu'elle serait à l'œil nu ; elle est environ 8 fois plus pâle que l'objet vu à l'œil nu. Et encore, dans cette estimation, ne tenons-nous aucun compte des pertes de lumière qui s'effectuent dans l'instrument.

Les effets fâcheux de ce défaut de clarté sont en partie compensés par l'avantage qu'il y a de regarder à travers un tube qui élimine la lumière venant des corps autres que celui que l'on observe, lumière qui trouble la vision, dans les circonstances ordinaires.

1318. **Lunette terrestre.** — La lunette astronomique fait voir les objets renversés ; ce renversement est tout à fait indifférent pour l'astronome, mais il est très-désagréable quand il s'agit d'observer, au loin, les objets que nous sommes habitués à voir à la surface de la terre. Pour ces sortes d'observations, on munit la lunette d'un oculaire spécial qui redresse les images. Il est composé de trois lentilles : la première L (*fig.* 648) se dispose de telle sorte que l'image AB donnée par l'objectif (image qui est dans la réalité très-petite, mais que nous sommes obligés de figurer un peu grande pour que les constructions puissent être tracées nettement), de telle sorte, disons-nous, que l'image AB soit au foyer principal de cette lentille. Chaque point de AB est alors au foyer principal de l'axe secondaire qui passe par ce point, et les rayons qui émaneront de

A, par exemple, sortiront tous de la lentille L suivant des lignes parallèles à l'axe secondaire AO correspondant à ce point. La seconde lentille L' reçoit ces rayons et les fait converger en un point A' qui est le foyer principal de l'axe secondaire A'O' parallèle aux rayons *aa'* et appartenant à la lentille L'. Si bien que l'image de AB se formera en A'B'. Cette image sera égale à l'objet si les deux lentilles L et L' sont identiques.

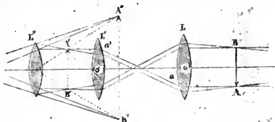


Fig. 648.

Les axes secondaires AO et A'O' sont, en effet, parallèles entre eux comme parallèles aux rayons *aa'*, et pour que A' se retrouve élevé au-dessus de l'axe autant que A est au-dessous, il faut que les distances focales AO, A'O' soient égales entre elles. L'image A'B' redressée est regardée avec une loupe L''.

Le système des trois lentilles est d'ailleurs porté par un tuyau qui les tient ensemble à distance fixe l'une de l'autre. L'observateur met l'oculaire au *point*, en l'écartant ou le rapprochant de l'objectif, comme dans le cas de l'oculaire de la lunette astronomique.

1319. **Lunette de Galilée.** — L'invention de la première lunette connue est attribuée à Galilée et on l'appelle aujourd'hui lorgnette de spectacle à cause de l'usage auquel elle est presque exclusivement employée.

Cette lunette se compose de deux verres, l'un L (*fig.* 649, 650) est placé

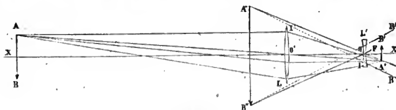


Fig. 649.

du côté de l'objet et est composé d'une lentille convergente qui donnerait une image réelle A'B' d'un objet AB : mais on ne laisse pas l'image A'B' se former. Une lentille divergente L', servant d'oculaire, est interposée de telle sorte que son foyer F, soit voisin du point où se produit l'image A'B', et alors, comme nous l'avons montré (1233), il se forme, de l'objet virtuel

et renversé A'B', une image virtuelle redressée et agrandie qui apparait en A''B'' pour l'œil placé derrière L'. Il est inutile de reproduire ici le raisonnement déjà fait. Le lecteur n'a qu'à se reporter au paragraphe que nous venons d'indiquer.



Fig. 650.

Un système de tuyaux T, T' (*fig.* 650) porte les lentilles, et chacun selon sa vue éloigne plus ou moins l'oculaire de l'objectif pour obtenir une perception nette des objets.

TÉLESCOPES.

1320. On donne le nom de télescopes à des instruments qui sont destinés, comme la lunette astronomique, à l'observation des objets éloignés, mais où les fonctions de l'objectif sont remplies par un miroir concave qui rassemble en une image petite et très-brillante, les rayons divergents qu'il reçoit sur sa large surface. Cette image est ensuite observée par des moyens analogues à ceux que nous avons déjà décrits, en parlant des lunettes.

1321. Télescope d'Herschell. — Le télescope le plus simple est celui qu'Herschell employait pour ses observations astronomiques. Il était composé d'un miroir concave que l'on dirigeait vers les régions du ciel que l'on voulait explorer. Au foyer principal des axes secondaires, se formait l'image des points du ciel, situés à l'extrémité de chacun de ces axes. Avec une loupe qu'il tenait à la main, Herschell pouvait étudier dans tous ses détails, l'image grossie qui se formait au foyer de son télescope. Nous avons vu dans le chapitre de la réflexion, que le miroir concave donne, entre le foyer principal et le centre, les images renversées des objets situés au delà du centre; d'autre part, la loupe ne change pas le sens de cette image. C'était donc le ciel renversé qui s'étalait, sous les yeux d'Herschell, au foyer de son instrument, mais cette circonstance ne présente aucun inconvénient quand l'observateur est prévenu.

Un instrument de cette espèce a un défaut qui résulte de sa simplicité même. Pour que l'observateur puisse regarder, il faut qu'il se place sur le prolongement des rayons qui viennent de s'entre-croiser pour former l'image, et sa tête s'interpose alors entre le ciel et le miroir; il empêche en partie les rayons incidents d'arriver sur la surface réfléchissante, ce qui nuit à la clarté des images. Avec un miroir de petites dimensions, ce défaut ne serait pas tolérable, car presque toute la surface serait cachée par l'observateur. Mais Herschell employait des miroirs qui mesuraient jusqu'à 2 mètres de diamètre, et ce n'était qu'une assez petite partie de l'instrument qui était perdue par la nécessité de se placer devant le miroir. D'ail-

leurs, il diminuait encore l'inconvénient signalé en n'observant que les images qui se formaient sur un axe secondaire voisin des bords de la surface réfléchissante. A cela toutefois, il y avait un désavantage, c'est que les images étaient moins nettes que si elles eussent été placées sur l'axe principal.

Le miroir du télescope d'Herschell, dont nous avons fait connaître les dimensions, était en métal. Afin qu'il ne s'infléchît pas sous son propre poids, il fallait lui donner une épaisseur très-grande. De là résultait la nécessité, pour changer l'orientation d'une masse aussi considérable, de l'emploi d'énormes machines mises en mouvement par plusieurs hommes. La charpente nécessaire pour supporter et faire mouvoir le colossal instrument occupait un très-grand espace. Depuis Herschell, lord Ross a construit un télescope encore plus puissant, et semblable d'ailleurs en théorie, à celui d'Herschell. Mais les dépenses d'installation sont tellement fortes que peu d'imitateurs se sont trouvés pour établir des appareils aussi coûteux.

1322. **Télescope de Newton.** — La méthode d'Herschell n'est pas applicable aux télescopes de petites dimensions. On emploie alors la disposition imaginée par Newton. Elle consiste à recevoir sur un miroir plan P les rayons qui, venant en A'B' (*fig.* 651) donneraient l'image renversée des objets extérieurs. Ce miroir incliné à 45° sur l'axe et placé avant des points de concours des rayons réfléchis donne une image A″B″ placée à angle droit par rapport à la première. C'est A″B″ que l'on regarde avec une loupe O.

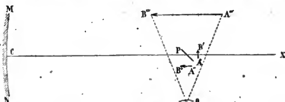


Fig. 651.

Les deux réflexions successives occasionnent une perte de lumière considérable : c'est pour éviter l'une de ces réflexions qu'Herschell employait son système. Newton en avait amoindri les inconvénients en rendant la perte aussi faible que possible, et il se servait, dans ce but, de la face hypoténuse d'un prisme à réflexion totale.

1323. **Télescope de M. Foucault.** — Les deux espèces de télescopes décrits sont les seuls qui aient été employés avec quelque succès par les astronomes, bien qu'un grand nombre d'autres systèmes eussent été proposés, systèmes ingénieux en théorie, mais sans aucun intérêt pratique. Nous pouvons même ajouter que, depuis la construction des lunettes achromatiques, les seuls télescopes qui présentent une supériorité véritable

sur les lunettes, pour donner une perception distincte et détaillée des objets célestes, étaient les télescopes d'Herschell. Mais, comme nous le disions plus haut, la construction et l'installation des grands miroirs occasionnent des dépenses tellement considérables, que l'emploi de ces télescopes est demeuré très-restreint. En outre, le poids de ces instruments ne permet pas de les transporter sur les hautes montagnes, là où la transparence de l'atmosphère permettrait d'utiliser toute leur puissance. Tel était l'état de la question, lorsque M. Foucault fut conduit à s'occuper du télescope. Avec sa sagacité ordinaire, l'habile physicien est arrivé promptement à construire des instruments qui l'emportent de beaucoup, pour la netteté des images, sur le télescope d'Herschell ; ils ne sont plus gênants par leur masse énorme, et inabordables par leur prix.

M. Foucault eut d'abord l'idée de substituer le verre au métal ; et de recouvrir d'une couche très-mince d'argent la surface vitreuse, après lui avoir donné la courbure voulue. Cette idée, qui avait été mise à l'essai, mais non poursuivie, par M. Steinheil, quelque temps auparavant, sans que M. Foucault en eût eu connaissance, cette idée réalisée par lui eut deux avantages : 1° le poids du télescope fut diminué ; 2° la taille en fut moins coûteuse ; 3° enfin, la couche d'argent poli possède un pouvoir réfléchissant beaucoup plus grand que celui du métal des miroirs, et dès lors les images acquièrent un plus vif éclat.

M. Foucault ne construisit, dans ses premiers essais, que des miroirs de petite surface. Puis, il aborda la construction d'un miroir de 42 centimètres de diamètre. L'ouvrier chargé de le tailler, en forme de calotte sphérique, échoua à cinq reprises différentes. La surface présentait des irrégularités qui auraient enlevé toute netteté aux images. Cet insuccès, qui montra l'insuffisance des procédés employés pour la taille des verres, eut d'heureuses conséquences, car M. Foucault fut obligé d'entreprendre une série de recherches ayant pour objet de reconnaître exactement où se trouvaient les défauts des surfaces taillées, afin de pouvoir ensuite les corriger. A la suite d'un examen attentif de la question, il parvint à obtenir des miroirs dépourvus de ce défaut qu'on croyait inévitable : l'aberration de sphéricité.

Le but fut donc atteint et même dépassé : et ce qui n'avait pas été tenté jusque-là, M. Foucault parvint à le réaliser. Ayant trouvé des moyens ingénieux de déterminer le point où chaque rayon, pour ainsi dire, vient couper l'axe ; sachant reconnaître avec précision quels sont les éléments de surface du miroir qui réfléchissent dans une fausse direction des rayons qui s'égarent ensuite ; ayant une méthode sûre pour retoucher ces éléments défectueux et ces éléments seuls ; il construisit des télescopes tels que les rayons émanés d'un point situé à une distance infinie vinrent tous converger rigoureusement au même point. A la courbure sphérique fut

substituée une courbure parabolique qui permit d'obtenir des images admirables de netteté. En un mot, l'aberration de sphéricité fut annulée.

La disposition de l'instrument est d'ailleurs celle que Newton employait : un prisme à réflexion totale renvoie l'image produite vers un oculaire qui, au lieu d'être une simple loupe, est l'oculaire de la lunette astronomique. En MN (*fig.* 652) est le miroir concave, en O se trouve l'oculaire par lequel on regarde l'image réelle fournie par le miroir. Les pièces AA', PQ, SS

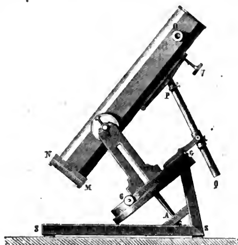


Fig. 652.

forment le pied de l'instrument qui peut tourner autour de l'axe AA', prendre des inclinaisons diverses au moyen du support PQ, si bien qu'il est possible de les diriger aisément vers le point à étudier.

CHAPITRE IV

DAGUERRÉOTYPIE. — PHOTOGRAPHIE

1324. **Première idée de la photographie.** — La chambre noire munie d'une lentille convergente enchâssée dans un trou que l'on a pratiqué dans le volet, nous donne une image réelle, renversée, d'un objet extérieur et plus petite que lui, lorsque cet objet est placé à une distance de la lentille plus

grande que le double de la distance focale principale. Nous avons vu (1225), qu'à l'aide de dispositions faciles à réaliser, cette image vient se peindre, soit sur une lame de verre dépolie, soit sur une feuille de papier, de telle manière qu'il est possible à un dessinateur d'en suivre avec le crayon tous les contours et d'en indiquer les moindres détails. Mais cette opération si simple en apparence présente, quand on en vient à l'exécution, des difficultés réelles. Il faut une grande patience et une grande habitude de ce genre de dessin pour obtenir un croquis satisfaisant d'une image qui vient pourtant s'étaler sur l'écran avec tant de netteté et de finesse, et qui conserve même, aux différents corps, les teintes véritables qu'ils ont dans la nature. Il était, à coup sûr, bien séduisant pour le génie de l'homme d'arriver à la solution d'une question qui se présentait naturellement à l'esprit, et qu'on pouvait formuler ainsi : supprimer le dessinateur et le remplacer par la lumière elle-même qui, en vertu de son action chimique, formera d'une manière durable sur un écran convenablement choisi, l'image si fugitive des corps placés en dehors de la chambre noire. Ce problème a été posé ; il a été résolu ; et les résultats obtenus offrent aujourd'hui une perfection qu'on n'osait pas espérer, il y a trente ans.

1325. **Propriétés photogéniques du chlorure d'argent.** — Vers la fin du dernier siècle, Scheele avait remarqué, sans y attacher aucune importance, que du papier imprégné de chlorure d'argent humide se conserve parfaitement blanc dans l'obscurité, tandis qu'il acquiert, par son exposition au soleil et même à la lumière diffuse, une teinte violacée passant rapidement au noir foncé. Le sel d'argent, comme nous l'avons déjà indiqué, éprouve une réduction partielle sous l'influence des rayons lumineux, et abandonne de l'argent métallique. Celui-ci, dans l'état de division extrême où il se trouve à la suite de sa mise en liberté, produit cet aspect noirâtre offert par la feuille de papier qu'il recouvre.

1326. **Progrès dus à Daguerre** (*Daguerréotype*). — Il est remarquable que le chlorure d'argent dont l'impressionnabilité, sous l'action de la lumière, avait été tout d'abord constatée, et qui rend de nos jours de si grands services pour la production des images daguerriennes ait été méconnu dans ses bons effets et négligé par les premiers inventeurs de la photographie. Niepce, à qui on doit la première solution du problème qui nous occupe, employait dès 1826, comme substance photogénique, le bitume de Judée.

Mais sa méthode ne donna que des résultats très-imparfaits. Ce fut Daguerre, qui, à la suite de son association avec Niepce, découvrit un procédé d'une application facile et dont le succès est toujours certain, quand on suit exactement les prescriptions de l'inventeur. Les détails de ce procédé furent dévoilés au public en 1839, dans un rapport remarquable présenté par Arago à la Chambre des députés. L'appareil imaginé par Daguerre, et

qui n'est, au fond, que la chambre noire de Porta, a reçu depuis cette époque le nom de *daguerréotype*.

La couche impressionnable déposée sur la plaque métallique était l'iodure d'argent, qui, dans les parties atteintes par la lumière, éprouve une modification, soit dans sa nature chimique, soit dans sa structure moléculaire, modification qui ne se traduit d'abord par aucun changement dans l'aspect uniforme de la couche. Mais, si la plaque impressionnée est soumise à l'action d'un courant ascendant de vapeur mercurielle fournie par le liquide chauffé à 60°, l'image, jusque-là inaperçue, se développe avec une vigueur croissante, et reproduit bientôt, dans ses moindres détails, l'objet lumineux placé devant l'objectif de la chambre obscure. L'examen microscopique de la plaque, effectué à la suite du développement de l'image, montre que de nombreux globules de mercure extrêmement petits se sont déposés dans tous les points primitivement frappés par la lumière. C'est leur teinte blanche qui correspond aux tons clairs de l'objet; au contraire, dans les portions demeurées dans l'obscurité, l'iodure s'est conservé intact, le mercure n'a effectué aucun dépôt sensible, et si l'on vient alors à dissoudre cet iodure inaltéré, par l'emploi d'un dissolvant approprié, l'hyposulfite de soude, ce sont les parties dénudées du métal poli, qui reproduisent les parties sombres de l'objet.

Nous n'avons pas l'intention de décrire ici, d'une manière complète, le procédé de Daguerre, il est aujourd'hui tout à fait abandonné et remplacé avec beaucoup d'avantage par la photographie sur papier. Nous nous bornerons à donner un résumé succinct de la méthode.

1327. **Production des images sur les plaques métalliques.** — La lame métallique, destinée à recevoir l'image, était constituée par une plaque mince d'argent pur soudée à une plaque de cuivre. Elle était nettoyée avec les plus grands soins, d'abord avec l'acide nitrique faible, puis avec l'alcool, et finalement, on lui donnait un poli aussi parfait que possible, en se servant de tripoli très-fin et de rouge d'Angleterre. La plaque était ensuite soumise, dans une boite close, à l'action de la vapeur d'iode jusqu'à ce qu'elle eût pris une teinte uniforme d'un beau jaune d'or. A partir de ce moment, elle était devenue sensible à la lumière, et on ne devait plus la manier que dans l'obscurité. On l'introduisait alors dans la chambre obscure à la place même de la lame de verre dépolie, mise préalablement au foyer. Quand on jugeait que la durée de l'exposition était suffisante, ce qu'on estimait par des expériences d'essai exécutées à l'avance, on la retirait de la chambre noire pour la porter dans la boîte à mercure, et la soumettre, sous une inclinaison de 45°, à l'action de la vapeur mercurielle. Enfin, quand l'image avait acquis son maximum d'intensité, on la rendait désormais inaltérable par la lumière, en la plongeant dans une dissolution d'hyposulfite de soude. Il n'y avait plus, à la suite de

cette fixation de l'image, qu'à laver la plaque à grande eau et à la sécher.

1328. **Inconvénients résultant de l'emploi d'une plaque métallique.** — Le procédé de Daguerre, quoique bien complet, laissait à désirer sous plusieurs rapports. Les images étaient trop plates, elles manquaient de relief, l'opposition des lumières et des ombres était souvent trop peu marquée ; enfin, la durée de l'exposition dans la chambre obscure était trop grande ; il fallait au moins un quart d'heure pour obtenir l'image d'un édifice éclairé par le soleil. Aussi, dans les premiers temps de l'emploi du daguerréotype, désespérait-on de pouvoir jamais faire le portrait. Mais des perfectionnements nombreux ne tardèrent pas à être découverts : le dépôt successif de la vapeur d'iode et de la vapeur de brome, sur une même plaque, donna à la couche impressionnable cette sensibilité qu'il était si important de lui faire acquérir, et bientôt, on put faire des portraits à l'ombre, après une pose de vingt à trente secondes ; la dissolution aqueuse de brome, le bromure d'iode, la chaux bromée furent les réactifs successivement employés pour rendre la couche très-sensible.

1329. **Perfectionnements dus à M. Fizeau.** — M. Fizeau introduisit un perfectionnement qui constitue peut-être, à lui seul, le plus grand progrès qu'ait accompli la daguerréotypie proprement dite, depuis 1839. Il proposa de chauffer la plaque métallique, à la suite de la fixation de l'image, au contact d'une dissolution faible d'hyposulfite double d'or et de soude. Dans ces conditions, l'image se renforce visiblement, elle prend du relief, un ton vigoureux qu'elle n'avait pas auparavant, et en même temps, comme elle se recouvre d'une couche d'or qui est assez mince pour demeurer transparente, elle devient à peu près inaltérable.

Malgré tout, deux inconvénients graves restaient inhérents à l'usage de la plaque de métal. Les noirs de l'image offraient, dans tous les cas, un miroitement désagréable qui ne permettait de saisir l'ensemble du dessin, que lorsqu'on était parvenu, en tâtonnant, à placer la lame brillante dans une inclinaison convenable par rapport aux rayons lumineux qui la frappaient. En outre, l'image obtenue une première fois ne pouvait se reproduire par elle-même, il fallait une exposition à la chambre obscure pour chaque épreuve nouvelle. La production de clichés indélébiles comparables à la planche burinée par le graveur et capables, comme elle, de reproduire, autant de fois qu'on le voudrait, une même image daguerrienne : tel était évidemment le nouveau problème qui devait fournir un intéressant sujet d'études aux physiciens et aux nombreux adeptes de la photographie.

Il est juste de signaler, à la reconnaissance des amis des sciences expérimentales, les noms de MM. Talbot, Bayard, Blanquart-Evrard, Niepce de Saint-Victor, le neveu du premier inventeur, Poitevin, qui par leurs travaux persévérants et leur dévouement à la science, ont le plus

contribué aux progrès admirables que la photographie a accomplis, dans un si petit nombre d'années. Nous ne saurions suivre ici les transformations diverses qu'ont subies les procédés mis en œuvre, aux différentes époques. Ces détails, qui ont pris maintenant le caractère de documents historiques, trouvent naturellement leur place marquée, dans un traité spécial de photographie, nous devons nous contenter de décrire la méthode qui est généralement suivie en ce moment, et dont tout le monde est en mesure d'apprécier les excellents résultats.

PHOTOGRAPHIE SUR PAPIER.

1330. **Indication générale des opérations.** — La marche générale des opérations est celle-ci : 1° Déposer à la surface d'une lame diaphane, (une lame de verre, une feuille de papier), sous la forme d'une pellicule mince et homogène, une substance impressionnable à la lumière : le chlorure, le bromure, l'iodure, le fluorure d'argent ; ou un mélange de quelques-uns de ces composés ; 2° introduire la lame dans la chambre obscure, pour qu'elle y subisse l'action de la lumière ; 3° faire apparaître l'image, par l'emploi d'un agent chimique convenable qui réduira partiellement le sel d'argent dans les parties que la lumière aura atteintes, et qui constituera dès lors l'agent révélateur. De cette façon, les blancs de l'objet seront représentés par des noirs sur l'image, et les noirs par des blancs. En un mot, l'image sera l'inverse de l'objet, ou, comme on le dit, l'image sera *négative;* 4° fixer l'image, c'est-à-dire la rendre désormais inaltérable par la lumière, en dissolvant toute la portion de matière saline que les radiations lumineuses n'ont point modifiée.

Ces quatre opérations nous ont mis en possession du cliché. Maintenant l'image négative ainsi déposée et fixée sur une lame diaphane va servir à la production, sur papier, d'autant d'images qu'on le voudra, dans lesquelles les clairs et les ombres de l'objet reprendront leur place naturelle. Ces images, par opposition avec les précédentes, sont appelées *positives.* Il suffira, pour les obtenir, de placer derrière le cliché une feuille de papier imprégnée de chlorure d'argent dans l'obscurité, et d'exposer le tout, dans un châssis, à l'action de la lumière solaire. Les rayons, passant à travers les parties blanches de l'image négative, les traduiront en noir sur le papier chloruré, et inversement, les parties noires du cliché, arrêtant les rayons lumineux au passage, laisseront des blancs correspondants sur la feuille en contact. Il n'y aura plus qu'à dissoudre l'excès de chlorure pour avoir une image positive fixée.

Telle est la suite ordinaire des opérations à exécuter; étudions-les maintenant de près, une à une.

1331. **Formation de la couche sensible. — Emploi du collodion.** —

Négatifs sur collodion. — Le réactif chimique (habituellement iodure d'argent), destiné à recevoir l'impression lumineuse, se présenterait sous la forme d'une matière pulvérulente, sans cohésion, si l'on se contentait de le déposer à la surface de la lame de verre ; il est indispensable de le convertir, par l'intermédiaire d'une liqueur visqueuse susceptible de dessiccation, en une couche continue, homogène, suffisamment résistante, qui adhère fortement à la lame diaphane. Le véhicule employé dans ce but a beaucoup varié; on s'est successivement servi de l'albumine et de la gélatine ; on emploie aujourd'hui de préférence le collodion qui provient de la dissolution dans un mélange d'éther et d'alcool d'une variété convenablement choisie de coton-poudre : c'est de la production des négatifs sur glace collodionnée que nous nous occuperons tout d'abord.

La composition des liqueurs photogéniques destinées à sensibiliser la couche de collodion, à faire apparaître l'image, à la renforcer et à la fixer, change pour ainsi dire avec chaque opérateur ; aussi, trouve-t-on dans les livres et les recueils scientifiques l'indication de formules très-différentes, pour arriver à un même résultat. Nous devons à l'obligeance de M. A. Martin, bien connu par d'importants travaux sur la photographie, la communication des dosages auxquels il a recours pour préparer ses liqueurs. Nous sommes d'autant plus heureux de pouvoir insérer ici ses formules qu'il nous a été possible de nous convaincre, par notre propre expérience, des excellents résultats qu'elles procurent.

I. — PRÉPARATION DES LIQUEURS PHOTOGÉNIQUES POUR IMAGES NÉGATIVES

1332. (A) **Collodion ioduré.** — On prend :

Éther rectifié à 62°	65cc
Alcool à 40°	35cc
Iodure de cadmium	0gr,6
Iodure d'ammonium	0gr,4
Bromure d'ammonium	0gr,2

On fait dissoudre les iodures et le bromure dans tout l'alcool, on filtre la solution et on l'ajoute à la quantité d'éther indiquée ; puis on introduit dans le mélange 1 gramme de coton-poudre, soluble sans résidu (*). —

(*) M. Martin, qui s'est spécialement occupé de la préparation et de la composition des diverses variétés de coton-poudre, en distingue de quatre sortes : 1° le coton à 5 équivalents d'acide hypoazotique ou *coton fulminant*, insoluble dans le mélange d'éther et d'alcool, et tout à fait impropre aux applications photographiques ; 2° le coton à 4 équivalents d'acide hypoazotique soluble sans résidu dans le mélange éthéré, *c'est le véritable coton photographique* ; 3° le coton à 3 équivalents ou *coton poudreux* soluble comme le précédent, mais donnant une couche moins tenace sur la lame de verre. Un mélange à parties égales de ces deux dernières variétés, paraît très-convenable pour la photographie ; 4° le coton à 1 équivalent, soluble même dans l'eau et donnant une couche sans cohérence.

On laisse la liqueur ainsi préparée se reposer pendant deux jours dans un flacon bien bouché, et au bout de ce temps, on la décante pour la distribuer dans plusieurs petits flacons qu'on devra conserver, pour l'usage, pleins et hermétiquement clos. En opérant comme il vient d'être dit, la liqueur obtenue est très-limpide, elle présente une légère teinte jaune et peut se conserver indéfiniment, sans altération.

1333. (B) **Bain d'argent.** — Il est très-important que le nitrate d'argent, qui, par sa réaction sur l'iodure de cadmium et l'iodure d'ammonium, donnera l'iodure d'argent, soit à l'avance saturé de ce dernier sel. Par ce moyen, il ne pourra dissoudre aucune portion de l'iodure développé sur la plaque, et dès lors une cause fréquente de variations dans l'état de la couche sensible se trouvera éliminée. Cette saturation du bain doit être faite dans l'obscurité. On prend :

Nitrate d'argent cristallisé...........	40gr
Eau distillée........................	100ccc

Dans cette dissolution, on ajoute quelques gouttes de la solution suivante :

Alcool à 40°........................	10ccc
Iodure de cadmium.................	2gr
Iode en grain.......................	0gr,5

Il se forme un précipité d'iodure d'argent qui se redissout d'abord ; mais on continue de verser la solution alcoolique, goutte à goutte, jusqu'à la production d'un précipité permanent. On filtre à ce moment, on ajoute à la liqueur filtrée 400ccc d'eau distillée, elle se trouble de nouveau, prend un aspect laiteux et exige, pour être prête à servir, une seconde filtration.

1334. (C) **Liquide révélateur employé pour le développement de l'image, au sortir de la chambre obscure.** — Si l'on doit faire un grand nombre d'expériences le même jour, on prend :

Eau distillée ou eau de pluie..........	400ccc
Acide acétique cristallisable, de.......	15ccc à 25ccc
Acide pyrogallique....................	1gr

La liqueur est renfermée dans un flacon qu'on conserve à l'abri de la lumière. Il est bon toutefois de la préparer peu de temps avant son emploi. Quand on a quelque raison de penser que la durée de la pose a été insuffisante, au lieu d'employer la liqueur (C), on développe l'image, en se servant comme réducteur, d'une dissolution de sulfate de fer ; on fait dissoudre dans

(D)	Eau.................................	250ccc
	Sulfate de fer pur	50gr

d'autre part dans

Eau........	100^{ccc}

on fait dissoudre

Acétate de plomb.......	3^{gr}

On filtre la deuxième solution; on l'additionne de 20 centigrammes d'acide acétique, et on la mélange à la première; il se forme un précipité; on filtre et on mélange la liqueur obtenue avec :

Eau..............................	400^{ccc}
Éther acétique......................	3^{ccc}
Éther nitreux (nitrique du commerce).	3^{ccc}

Enfin, si la durée de la pose a été extrêmement courte; si, en un mot, on veut arriver à l'instantanéité des épreuves, tout en conservant au collodion et au bain d'argent leur composition primitive, on double la dose d'éther nitreux dans l'eau éthérée dont nous venons de donner la composition, et on l'ajoute au bain de fer (D) : on ne fait alors le mélange qu'au moment de s'en servir.

La liqueur qui résulte de ce mélange fait apparaître l'image avec une grande rapidité et lui donne des noirs très-intenses.

1335. (E) **Liqueur propre à renforcer l'image quand les noirs manquent de vigueur.** — L'image venue à l'acide pyrogallique ou au sulfate de fer est souvent trop faible; le cliché qu'elle fournirait ne pourrait donner que des positifs très-pâles. D'un autre côté, sous peine de détériorer l'épreuve, on ne saurait prolonger l'action de l'acide pyrogallique au delà du moment où ce liquide prend une teinte brun de lessive. On fait alors écouler de la surface de la lame de verre la liqueur brunâtre qui y formerait un dépôt noir, et on renforce l'image de la manière suivante :

Quelques gouttes d'une solution de nitrate d'argent dans l'eau à 5 p. 100 seront versées dans cette même liqueur (C), qui a servi au développement de l'image; puis le mélange des deux liquides est répandu sur l'épreuve dont il augmente presque aussitôt la vigueur.

1336. (F) **Liqueur pour fixer l'image négative.** — On mélange parties égales d'eau de pluie et de dissolution saturée d'hyposulfite de soude. Ce liquide, au contact de l'épreuve, dégage rapidement l'image, en la débarrassant de tout l'iodure d'argent en excès.

II. — PROCÉDÉ OPÉRATOIRE POUR LA PRODUCTION DES CLICHÉS.

Les liqueurs étant préparées, en suivant les dosages que nous venons d'indiquer, et en se servant de produits purs (précaution capitale qu'il faut se garder de négliger), on procède à la *mise au point*.

1337. **Chambre obscure. — Mise au point.** — La chambre obscure aujourd'hui employée n'est plus aussi simple que du temps de Daguerre; l'objectif est à verres combinés: Il se compose de deux lentilles achromatiques O et O' (*fig.* 653), qui sont fixées à une distance invariable l'une de l'autre aux deux extrémités d'un même tube de cuivre; ce tube, par l'emploi d'une vis sans fin V et d'une crémaillère, peut être rapproché ou écarté, tout d'une pièce, de l'écran dépoli G placé au fond de la chambre, quand on veut effectuer la mise au point. Quelquefois, la lentille antérieure O est mobile par rapport à l'autre O', et son déplacement a lieu à l'aide d'une disposition mécanique semblable à la précédente. L'emploi des objectifs à verres combinés a permis de raccourcir le temps de pose, et en même temps l'introduction de diaphragmes de diamètres convenables, en avant de la première lentille, supprime les rayons marginaux et contribue à donner plus de netteté à l'image.

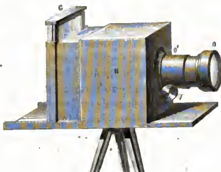


Fig. 653.

La boîte de bois B, dans l'intérieur de laquelle la plaque de verre recouverte de la couche sensible subira, après avoir pris la place de la glace dépolie, l'action des faisceaux lumineux réfractés par l'objectif, est formée de deux parties: l'une fixe qui porte les verres convergents, l'autre mobile qui porte la glace dépolie.

On dirige l'axe de la lunette antérieure OO' vers la partie centrale de l'objet à reproduire, de façon à rendre cet axe perpendiculaire au plan tangent aux diverses surfaces dont les contours doivent être dessinés, avec le plus de netteté. Alors, en faisant mouvoir lentement, soit le fond mobile de la boîte, soit l'objectif, on arrive aisément à obtenir sur la glace dépolie une image très-nette de l'objet. La mise au point est réalisée.

1338. **Nettoyage des glaces.** — La glace est-elle neuve? il suffit de la laver avec soin à l'alcool et de la frotter avec un tampon de coton imprégné de tripoli fin délayé dans l'alcool; quand la surface du verre s'est un peu séchée, on enlève les dernières traces de tripoli avec du coton bien sec. La glace a-t-elle déjà servi à la production d'images daguerriennes? on la laisse séjourner pendant plusieurs heures dans l'acide azotique très-étendu d'eau, et on achève le nettoyage comme précédemment.

1339. **Dépôt sur la glace du collodion ioduré.** — On saisit la glace de la main gauche, par l'un de ses angles, et on verse le collodion ioduré (A) de

manière à recouvrir de liquide toute la surface vitreuse. On fait écouler ensuite l'excédant de collodion, en introduisant un autre angle de la glace dans le goulot d'un flacon, et on relève lentement cette dernière, pour que la liqueur en excès, se dirigeant vers le point le plus bas, se déverse dans le flacon. Le verre se trouve alors recouvert d'une couche mince, transparente et homogène de collodion ioduré.

1340. **Sensibilisation de la couche de collodion.** — Cette couche, par suite de l'évaporation de l'éther et de l'alcool, se dessécherait promptement; mais, on immerge la glace, peu de temps après le dépôt de la couche visqueuse, dans le bain d'argent (B), où on l'abandonne à elle-même pendant deux minutes. Cette opération et celles qui suivent doivent être faites dans l'obscurité, ou du moins dans une chambre qui ne reçoive la lumière du jour ou celle d'une lampe qu'à travers des verres jaunes. Une réaction chimique importante s'accomplit dans le bain: les iodures et les bromures de cadmium et d'ammonium se transforment en iodure et bromure d'argent, et quand on retire la glace on la trouve recouverte d'une couche d'un blanc très-légèrement jaunâtre qui présente un aspect opalin.

1341. **Exposition dans la chambre noire.** — Au sortir du bain d'argent, on laisse la glace s'égoutter pendant quelques instants, on l'introduit dans un châssis à volet mobile, et on la porte rapidement dans la chambre noire, où elle est substituée à la glace dépolie. Le volet du châssis est soulevé, l'obturateur de la lunette écarté, et dès lors l'impression de la lumière peut librement se produire sur la couche sensible. Au bout d'un nombre de secondes qui dépend de l'intensité de la lumière (huit ou dix secondes au plus par un temps favorable, et pour un portrait à l'ombre), on replace l'obturateur, on abaisse le volet du châssis, et la plaque est reportée dans la chambre éclairée par les rayons jaunes.

1342. **Apparition de l'image négative.** — On verse à sa surface, la quantité de l'un des liquides réducteurs (C), ou (D), juste nécessaire pour la recouvrir; on voit alors l'image se développer, sous l'influence du réactif, d'une manière progressive, quand on emploie la liqueur (C); d'une manière presque subite, quand on se sert de (D). Si on ne la trouve pas assez vigoureuse, on la renforce avec la liqueur (E), comme il a été dit plus haut (1335).

Il est utile de remarquer qu'un réducteur, quelle que soit sa nature, n'agit sur l'iodure d'argent que la lumière a frappé, pendant quelques instants seulement, qu'autant que cet iodure est en contact avec un excès de nitrate d'argent; ceci nous explique le mode d'action de la liqueur renforçante, où l'acide pyrogallique intervient concurremment avec le nitrate.

1343. **Fixage du cliché.** — L'épreuve renforcée est lavée à grande eau et introduite dans le bain d'hyposulfite de soude (F). Quand elle est bien

éclaircie; on la lave de nouveau avec soin; on la sèche; et, si elle doit servir à tirer un grand nombre de positifs, on la vernit, soit avec de l'eau de gomme très-légère, soit avec un vernis au copal.

III. — ÉPREUVES POSITIVES. — PRÉPARATION DES LIQUEURS.

(G) **Bain d'argent.** Eau distillée........................ 400gr
Nitrate d'argent fondu................ 80gr

1345. (H) **Bain pour le fixage et le virage de l'épreuve.** — On prépare d'une part une dissolution de

Hyposulfite de soude.................. 100gr
dans
Eau de fontaine............... ...... 500gr

de l'autre on fait dissoudre

Chlorure d'or 1gr
dans
Eau ordinaire 500gr

On mélange parties égales de ces liqueurs en versant la seconde dans la première, au moment où l'on va s'en servir.

IV. — PROCÉDÉ OPÉRATOIRE POUR LE TIRAGE DES ÉPREUVES POSITIVES.

1346. On prend du papier albuminé et salé tel qu'on le trouve aujourd'hui dans le commerce. Après lui avoir donné des dimensions un peu plus grandes que celles du cliché, on l'étend à la surface du bain d'argent (G) où on le laisse s'imprégner pendant cinq minutes. Il se forme du chlorure d'argent dans la pâte même du papier et à sa surface. Au sortir du bain, on le laisse s'égoutter et on le fait sécher dans l'obscurité, en le suspendant à un crochet par l'un de ses angles, celui par lequel on l'a saisi, au moment où il a été retiré du bain. Le papier sensible, quand il est bien sec, est placé derrière le cliché, sa face chlorurée en contact avec le collodion; et on expose le tout au soleil dans un châssis fermé par une lame épaisse de verre. Les bords du papier qui dépassent les limites de l'image négative, prennent successivement, à mesure que l'action solaire se prolonge, les teintes violet pâle, violet foncé, bistre, vert bronze; quand cette dernière teinte est obtenue, on reporte le châssis dans une chambre éclairée faiblement, et on voit que l'image est un peu plus venue qu'elle ne doit l'être finalement. Cette circonstance est favorable, parce que, dans le bain d'hyposulfite, l'épreuve pâlit toujours un peu.

La feuille de papier sur laquelle l'image s'est développée est lavée avec soin à l'eau de pluie, pour la débarrasser du nitrate d'argent qu'elle a

retenu, et immergée ensuite dans le bain (H). Le chlorure double d'or et d'hyposulfite que contient ce bain fait virer l'épreuve et lui donne un ton noir fort agréable ; d'autre part, l'hyposulfite en excès dissout le chlorure d'argent que la lumière n'avait point altéré et fixe ainsi l'épreuve. Après une heure de contact avec la liqueur (H), l'épreuve est lavée plusieurs fois à grande eau et laissée pendant vingt-quatre heures au moins, dans un bain d'eau de fontaine qu'on renouvelle de temps en temps. La feuille de papier après ce lavage complet est enfin séchée à l'air libre.

COLLODION SEC.

1347. Dans le procédé qui vient d'être décrit, le collodion est toujours employé humide ; il offre en effet, dans ces conditions, une très-grande sensibilité ; et la durée de la pose, quand il s'agit de faire le portrait, peut être réduit à deux ou trois secondes par une bonne lumière ; mais cette manière d'opérer ne laisse pas que d'être fort incommode, lorsqu'on fait de la photographie loin de son laboratoire, en plein champ ; lorsque, par exemple, on veut prendre, en voyage, des vues de monuments ou des paysages. On a donc naturellement cherché à substituer, au collodion humide qui exige une exposition immédiate à la chambre obscure, et une foule d'opérations diverses et de lavages exécutés sans retard, un collodion sec qu'on pourra préparer et sensibiliser, tout à l'aise, dans son laboratoire, pour ne l'employer que trois semaines ou un mois après. La plaque collodionnée et recouverte à l'avance d'iodure d'argent, par la méthode ordinaire, sera alors enfermée dans une boîte bien close, à l'abri de la lumière. Quand on voudra prendre une vue ou faire un portrait, la plaque sensibilisée longtemps à l'avance, comme il vient d'être dit, sera introduite dans la chambre obscure, sans qu'elle ait vu le jour ; puis, à la suite d'une exposition suffisamment prolongée, on la renfermera de nouveau dans la même boîte, et ce ne sera que plusieurs jours après l'exposition, qu'on s'occupera de faire apparaître l'image.

1348. **Préparation du collodion sec.** — On a longtemps tâtonné pour arriver à ce résultat. Le collodion ordinaire, quand il est tout à fait sec, est devenu presque insensible à l'action de la lumière ; il fallait donc introduire dans sa masse une substance qui conservât à la couche sensible une certaine moiteur. On y est arrivé par l'introduction de matières résinoïdes. Voici le procédé suivi par M. A. Martin :

A 100[cc] de collodion ordinaire (liqueur A), on ajoute 5[cc] de la solution suivante :

(I)	Alcool à 40°	100[cc]
	Baume de Tolu	6[gr]
	Baume du Pérou	6[cc]

On filtre et on conserve pour l'usage.

Ce collodion est étendu sur la glace et sensibilisé à la façon ordinaire ; puis on lave la plaque avec beaucoup de soin à l'eau distillée, pour enlever l'azotate d'argent qui s'altérerait à la longue, et on la fait sécher dans une obscurité absolue. Quand elle est bien sèche, on vernit ses bords, avec un vernis à l'alcool, et on l'enferme dans la boîte à plaques.

La durée de la pose est égale à deux fois et demie celle qui est nécessaire, pour obtenir, dans les mêmes circonstances, de bonnes épreuves, avec le collodion humide.

Pour développer l'image, on fait d'abord séjourner la plaque une ou deux minutes dans l'eau ordinaire, on la retire du bain, pour verser à sa surface la solution pyrogallique (C), et on laisse cette dernière jusqu'à ce que la surface collodionnée soit bien unie et également imprégnée par la liqueur. On fait alors écouler la portion du liquide réducteur, que l'on vient d'employer, dans un vase, pour lui ajouter quelques gouttes de la solution de nitrate d'argent à 5 p. 100. En reversant alors le mélange sur l'épreuve, l'image se développe progressivement et on la renforce, si besoin est, par le procédé ordinaire que nous avons indiqué plus haut. Enfin on lave et on fixe à la façon habituelle.

Si, dans un essai préalable, on reconnaît que la couche de collodion se déchire facilement, on augmente la richesse de la solution alcoolique (I) en baume du Pérou liquide et on diminue d'autant la quantité de baume de Tolu.

FIN

PROBLÈMES

SECTION PREMIÈRE

LOIS DE LA PESANTEUR

La solution de la plupart de ces problèmes s'obtient en appliquant les formules sur le mouvement uniformément varié qui ont été donnés au § 64.

PROBLÈME 1. — Un corps est lancé de haut en bas dans la direction de la verticale avec une vitesse de 50 mètres par seconde. On demande au bout de quel temps, sa vitesse sera devenue égale à 99 mètres, et quel espace il aura alors parcouru. On ne tiendra pas compte de la résistance de l'air.

Solution.— Il suffit, pour résoudre la première partie de la question, d'appliquer la formule (§ 64) $v = v_0 + gt$, dans laquelle v est égal à 99 mètres, v_0 égale à 50^m, g, est l'accélération de la pesanteur $9^m,8$, et t l'inconnue x. On aura donc :

$$99 = 50 + 9{,}8x \quad \text{d'où} \quad x = \frac{99 - 50}{9{,}8} = 5.$$

Ainsi la vitesse demandée sera acquise au bout de 5 secondes.

L'espace parcouru s'obtiendra en appliquant la formule $e = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$ qui deviendra :

$$x = 50 \times 5 + 4{,}9 \times 25 = 372^m{,}5.$$

PROBLÈME 2. — Quelle est la vitesse initiale que doit posséder un mobile lancé de bas en haut dans le vide pour s'élever à une hauteur de $510^m,2$?

D'après ce qui a été dit (§ 63), on voit qu'il suffit de chercher la vitesse qu'acquerra un mobile en tombant d'une hauteur de $510^m,2$. La formule $v = \sqrt{2ge}$ se rapporte à ce cas particulier, il suffira de faire $v = x$ et $e = 510{,}2$ on aura :

$$x = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 510{,}2} = 100.$$

La vitesse initiale devra être de 100 mètres.

PROBLÈME 3. — Combien de temps un mobile lancé de bas en haut dans le vide avec une vitesse de 100 mètres, emploie-t-il pour revenir à son point de départ?

Solution. — L'égalité $v = v_0 - gt$ nous permet d'obtenir le temps qu'il emploie pour monter, il faut y faire $v = 0$, $v_0 = 100$, $t = x$; on a donc

$$x = \frac{100}{9,8} = 10^s,2.$$

D'autre part, pour redescendre il met le même temps que pour monter. Car, comme il tombe alors en chute libre, la formule $v = gt$ est applicable en y faisant $v = 100$, $t = x$. On a donc encore

$$x = \frac{100}{9,8} = 10^s,2.$$

La durée totale du mouvement est finalement $20^s,4$.

PROBLÈME 4. — Deux mobiles sont successivement lancés de bas en haut avec une même vitesse égale à 100 mètres. Quel est l'intervalle de temps x qui doit séparer les époques de leur départ pour que le second mobile se meuve pendant $8^s,7$ avant de rencontrer le premier? On ne tiendra pas compte de la résistance de l'air.

Solution.—Ce problème nous fournit l'occasion d'appliquer le principe démontré § 63, à savoir que : dans le mouvement retardé, le mobile, en redescendant, reprend, à chaque point de sa trajectoire, la vitesse qu'il y avait en montant. Il faudra donc écrire que le corps qui descend possède, au moment de la rencontre, la même vitesse que le mobile qui monte. La vitesse de ce dernier est donnée par l'égalité $v = v_0 - gt$, dans laquelle $t = 8,7$ et $v_0 = 100$; on a donc $v = 100 - 9,8 \times 8,7$. La vitesse du mobile qui descend est donnée par l'équation $v = g\theta$, puisqu'il tombe en chute libre; θ représentant cette fois le temps employé par lui, pour descendre du point le plus haut de son ascension jusqu'au point de rencontre, ce temps est égal à $8^s,7 + x$, moins le temps qu'il a employé pour son ascension totale, lequel est égal à

$$\frac{v_0}{g} \text{ ou } \frac{100}{9,8}.$$

On aura donc, pour la vitesse du mobile qui descend, au moment du choc :

$$v = 9,8\left(8,7 + x - \frac{100}{9,8}\right),$$

et finalement :

$$100 - 9,8 \times 8,7 = 9,8\left(8,7 + x - \frac{100}{9,8}\right); \quad \text{d'où} \quad x = \frac{200}{9,8} - 2 \times 8,7 = 3.$$

L'intervalle qui sépare les deux départs est de 3 secondes.

PROBLÈME 5. — Deux mobiles sont lancés de bas en haut, à 3 secondes d'intervalle, avec une vitesse de 100 mètres. A quelle distance du point de départ se rencontreront-ils?

PROBLÈME 6. — Un corps pesant est tombé dans le vide d'une hauteur de 240m,3156. Calculer sa vitesse finale. (*Nancy*, 1855.)

PROBLÈME 7. — Deux mobiles abandonnés, sans vitesse initiale, à l'action de la pesanteur sont partis du même point de l'espace, à une seconde d'intervalle l'un de l'autre. On demande au bout de combien de secondes la distance qui les sépare sera devenue égale à 98 mètres.

PROBLÈME 8. — Dans une machine d'Atwood, les deux poids invariables sont chacun de 50 grammes, et le poids additionnel de 5 grammes. Calculer : 1° le rapport des accélérations g et g' (g' étant = 9m,8088); 2° L'espace parcouru pendant les cinq premières secondes de la chute. — Par logarithmes.

(*Poitiers*, 1858.)

PROBLÈME 9. — Un corps est lancé horizontalement avec une vitesse de 20 mètres par seconde. On demande quelle est, au bout de 2 secondes, la grandeur et la direction de sa vitesse. On donne l'accélération de la pesanteur 9m,8.

PROBLÈME 10. — Des gouttes d'eau tombent avec une vitesse constante en suivant la verticale. Un tube cylindrique, ouvert aux deux bouts et incliné de 30° sur l'horizon, est transporté parallèlement à lui-même dans une direction horizontale avec une vitesse de 16m,989 par seconde. On demande quelle doit être la vitesse de chute des gouttes d'eau pour qu'elles puissent suivre le tube dans toute sa longueur parallèlement à son axe.

PROBLÈME 11. — Une pierre est tombée au fond d'un puits. On a entendu le bruit de sa chute 4s 1/2 après son départ. Quelle est la profondeur du puits? — On sait que le son parcourt 340 mètres par seconde. (*Poitiers*, 1860.)

PROBLÈME 12. — Une boîte à poids est composée des poids dont les valeurs sont, en commençant par les plus petits,

1mgr				
1mgr	1centigr	1décigr	1gr	
2mgr	2centigr	2décigr	2gr	
2mgr	2centigr	2décigr	2gr	
5mgr	5centigr	5décigr	5gr	etc...

Comment vérifier l'exactitude relative de ces poids?

PROBLÈME 13. — L'aiguille d'une balance chargée est au zéro : elle marche

de 5 divisions quand on ajoute 1^{mgr} dans l'un des plateaux. A quel poids correspondra un déplacement de 1 division $\frac{1}{2}$?

PROBLÈME 14. — On doit faire 20 pesées, et l'on sait que le poids du corps le plus lourd n'atteint pas 300^{gr}. Comment faut-il employer, dans ce cas, la méthode de la double pesée pour réduire les opérations au moins grand nombre possible, qui est 21 ?

PROBLÈME 15. — Les diverses pièces d'une balance sont constituées ainsi qu'il suit : Poids du fléau, 878^{gr}. — Longueur de chaque bras de levier, 27^{cm}. — Rayon de la circonférence que décrit l'extrémité de l'aiguille, 46^{cm}. — Distance des divisions devant lesquelles se meut cette extrémité, 3^{mm}. — On observe que, l'aiguille étant au zéro lorsque la balance est chargée, une addition de 1^{mgr} dans l'un des plateaux amène un déplacement de 5 divisions. Quelle est la distance du centre de gravité du fléau au point d'appui ?

SECTION II

PRINCIPE DE PASCAL ET SES CONSÉQUENCES

Les problèmes que nous avons groupés dans cette deuxième section se résolvent en appliquant le principe de Pascal (§ 88).

PROBLÈME 16. — Deux corps de pompe verticaux et cylindriques communiquent entre eux par un tube horizontal ; l'un a une section de 10 centimètres carrés, l'autre de 2 décimètres carrés ; de l'eau se trouve en équilibre dans l'appareil. Si l'on vient à poser sur la surface de l'eau, dans le grand corps de pompe, un piston du poids de 200 kilogr., avec quelle force faudra-t-il presser sur la surface du liquide dans le petit corps de pompe pour empêcher le piston de descendre ? (*Paris*, 1858.)

Solution. — La pression exercée sur le piston du grand corps de pompe est, par centimètre carré, $\frac{200^k}{200} = 1$ kilogr. Pour empêcher l'autre piston de descendre, il faudra exercer cette même pression sur chaque centimètre carré de sa surface : ce qui donne pour la pression cherchée :

$$1^k \times 10 = 10 \text{ kilogr.}$$

PROBLÈME 17. — Au centre de la base supérieure d'un tonneau plein d'eau est fixé un long tube vide ouvert aux deux bouts. On demande quel est l'accroissement de pression sur la base inférieure de ce tonneau qui résultera de l'introduction dans ce tube d'un kilogramme d'eau. Le rayon de la base du tonneau est de 30 centimètres, celui du tube est de 1 centimètre.

Solution. — Le tube étant cylindrique, l'accroissement de pression sera de

1 kilogramme sur la tranche de liquide qui soutient le kilogramme d'eau (§ 97). Cette pression se transmettra au fond du tonneau, et proportionnellement aux surfaces. Or le rapport de la base du tonneau et de celle du tube est $\frac{30^2}{1^2}$: donc

$1^k \times \frac{30^2}{1^2} = 900$ kilogr., telle est la pression cherchée.

Problème 18. — On suppose une presse hydraulique ayant deux corps de pompe, dont le grand a 4 décimètres de diamètre et le petit 3 centimètres de diamètre. La course du piston dans ce dernier corps de pompe est de 2 centimètres. On demande de combien de millimètres le piston s'est élevé dans le grand corps de pompe après sept coups de piston, et quelle est la pression exercée sur un corps par le grand piston quand on maintient sur la tige du petit piston un poids de 100 kilogrammes. (*Paris*, 1858.)

Problème 19. — On a un vase conique plein d'eau, sa base est de 275 centimètres carrés et son volume 2475 centimètres cubes. On demande quelle est en grammes la pression du liquide sur le fond du vase.

Problème 20. — Dans deux vases communiquants se trouve de l'eau qui s'élève à une certaine hauteur dans chaque vase. On verse dans l'un une colonne d'huile de $0^m,642$ de hauteur, et l'on demande quelle sera la hauteur de la colonne d'eau qui lui fera équilibre sachant que la densité de l'huile est 0,9.

Problème 21. — Un vase a la forme d'un tronc de cône. Sa base inférieure a un diamètre de $0^m,50$; sa base supérieure, de $0^m,25$; la hauteur est de $0^m,30$. On remplit complétement ce vase avec deux liquides, l'eau et le mercure, qui se superposent suivant leur ordre de densité : le mercure occupe une hauteur de $0^m,1$. On demande quel est le poids de chaque liquide et quelle est la pression totale supportée par la base inférieure. — On sait qu'un litre de mercure pèse $13^{kil},596$.

SECTION III

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE. — CORPS FLOTTANTS. — POIDS SPÉCIFIQUE

Dans les problèmes qui se rapportent au principe d'Archimède, la valeur de l'inconnue se déduit toujours directement du principe lui-même. Quand il s'agit de corps flottants, il faut écrire qu'au moment de l'équilibre le poids du corps, immergé en totalité ou en partie dans le liquide, est égal au poids du volume de liquide déplacé.

Dans les problèmes sur les poids spécifiques, c'est la relation établie au § 113 qui est le plus souvent utilisée.

Problème 22. — Une masse de cuivre est soupçonnée d'être creuse à son

intérieur. Son poids dans l'air est de 523 grammes ; dans l'eau, il n'est plus que de $447^{gr},5$. Sachant que le poids spécifique du cuivre est 8,8, on demande si le soupçon est fondé et, en ce cas, quel est en centimètres cubes le volume de la cavité intérieure.

Solution. — D'après le principe d'Archimède, le volume de la masse métallique est $523 - 447,5 = 75^{cc},5$. D'autre part, un morceau de cuivre massif, pesant 523^{gr}, a pour volume $\frac{523}{8,8} = 59,4$. Par conséquent, le volume apparent $75^{cc},5$ dépasse le volume réel $59^{cc},4$; la masse est creuse, et la cavité est de

$$75^{cc},5 - 59^{cc},4 = 16^{cc},1.$$

Problème 23. — Un bloc de glace prismatique flottant sur la mer s'élève à 6 mètres au-dessus de sa surface. On demande la hauteur totale x du bloc; on suppose la densité de l'eau de mer égale à 1,026 et celle de la glace à 0,93.

Solution. — Puisque le bloc de glace est flottant, cela prouve que le poids de l'eau déplacée est égal au poids du bloc entier. Le bloc de glace et l'eau déplacée forment donc deux colonnes de même poids ayant aussi même base : leurs hauteurs doivent être en raison inverse de leurs poids spécifiques. Or, si x est la hauteur du bloc de glace, $x - 6$ sera celle de l'eau, et l'on aura :

$$\frac{x}{x-6} = \frac{1,026}{0,93}; \quad \text{d'où} \quad x = \frac{6 \times 1,026}{1,026 - 0,93} = 64,1.$$

Ainsi, la hauteur totale du prisme de glace est de $64^m,1$.

Problème 24. — Une sphère de platine ayant 3 centimètres de rayon est suspendue au-dessous d'un des plateaux d'une balance très-exacte, et plonge complétement dans le mercure. Au-dessous de l'autre plateau est suspendu un cylindre de cuivre droit à base circulaire ayant aussi 3 centimètres de rayon. Ce cylindre plonge complétement dans l'eau ; on demande quelle doit être sa hauteur pour que l'équilibre ait lieu.

Densité de l'eau	.... =	1
— du mercure	.... =	13,59
— du cuivre	.... =	8,8
— du platine	.... =	22

(Concours général, 1861.)

Solution. — L'action exercée sur le premier plateau de la balance est égale au poids de la sphère de platine ou

$$\frac{4}{3}\pi \times \overline{3}^3 \times 22,$$

moins le poids du volume de mercure qu'elle déplace, c'est-à-dire moins $\frac{4}{3}\pi \times \overline{3}^3 \times 13,59$. L'action sur ce plateau est donc :

$$\frac{4}{3}\pi \times 27\,(22 - 13,59) \quad \text{ou} \quad \frac{4}{3}\pi \times 27 \times 8,41.$$

D'autre part, l'action exercée sur le second plateau est égale au poids du cylindre de cuivre de hauteur x ou $\pi \times \overline{3}^2 \times x \times 8,8$ moins le poids d'un égal volume d'eau, ou $\pi \times \overline{3}^2 \times x$. Elle sera donc cette fois

$$\pi \times \overline{3}^2 \times x\,(8,8 - 1) \quad \text{ou} \quad \pi \times \overline{3}^2 \times 7,8 \times x.$$

Puisque l'équilibre existe, ces actions sont égales, on a donc :

$$\frac{4}{3}\pi \times 27 \times 8,41 = \pi \times 9 \times 7,8 \times x\,; \quad \text{d'où} \quad x = \frac{4 \times 8,41}{7,8} = 4,3.$$

La hauteur du cylindre de cuivre doit être de $4^{\text{cent}},3$.

PROBLÈME 25. — Deux fragments, l'un de marbre, l'autre de fer, étant suspendus chacun à l'un des plateaux de la balance hydrostatique, se font mutuellement équilibre quand ils sont plongés tous deux dans l'huile. On donne le rapport de leurs poids réels 1,31 ; on donne le poids spécifique du marbre 2,8 ; celui du fer 7,7. On demande de déduire de ces résultats le poids spécifique de l'huile.

Solution. — La question est évidemment indépendante des poids absolus des corps et ne dépend que de leur rapport. Je prends pour unité le poids absolu du fer : le poids absolu du marbre sera 1,31.

Mais dans l'huile, le premier pèsera 1, moins le poids de l'huile déplacée, c'est-à-dire

$$1 - \frac{1}{7,7}\,x,$$

x étant le poids spécifique de l'huile ; le second pèsera :

$$1,31 - \frac{1,31}{2,8}\,x.$$

Comme, dans ces conditions, les deux corps se font équilibre, on aura :

$$1 - \frac{1}{7,7}\,x = 1,31 - \frac{1,31}{2,8}\,x\,;$$

d'où

$$2,8 \times 7,7 - 2,8\,x = 1,31 \times 2,8 \times 7,7 - 1,31 \times 7,7\,x$$

$$x = \frac{2,8 \times 7,7 \times 0,31}{1,31 \times 7,7 - 2,8} = 0,9.$$

PROBLÈME 26. — Un corps plongé dans l'eau pèse 10 grammes, et dans l'huile 12 grammes. Le poids spécifique de l'huile est 0,9, quel est le poids du corps ?

PROBLÈME 27. — Quel effort exigerait, pour être soutenu dans du mercure à 0°, un décimètre cube de platine, la densité du mercure étant supposée égale à 13,6 et celle du platine à 21,5 ?

PROBLÈME 28. — Un corps, dont le poids absolu est 550 grammes, a pour poids apparent dans l'eau 420 grammes; on demande : 1° quel est son volume; 2° quelle sera son poids apparent dans un liquide dont le poids spécifique est 0,48. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1855.)

PROBLÈME 29. — On demande le poids d'un bloc de marbre de forme cylindrique de $3^m,75$ de hauteur et de $0^m,85$ de diamètre ; la densité est 2,72. (*Paris*, 1855.)

PROBLÈME 30. — Sous le plateau A d'une balance parfaitement exacte, on suspend une masse de platine dont le volume est 347 centimètres cubes ; sous l'autre B, une masse de cuivre dont le volume est 500 centimètres cubes. Les deux morceaux de métal plongent, le premier dans l'eau, le second dans l'essence de térébenthine ; quel est le plateau qui l'emportera ? Quel poids faudra-t-il employer pour rendre au fléau son horizontalité habituelle ?

Poids spécifique du platine	.... =	21
— du cuivre	.... =	8,88
— de l'essence de térébenthine	.... =	0,868

PROBLÈME 31. — Un morceau de cuivre de forme cubique et du poids de $1^{kil},75$ est placé sur un tour et réduit à une sphère dont le diamètre est égal aux $\frac{75}{100}$ de la longueur du côté du cube primitif ; la densité du cuivre est 8,88. Calculer le poids de la tournure de cuivre que l'on a obtenue. (*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 32. — Un fil cylindrique en argent de $0^m,0015$ de diamètre pèse $5^{gr},2875$; on veut le recouvrir d'une couche d'or de $0^m,0002$ d'épaisseur. On demande quel sera le poids de l'or ainsi employé, sachant que la densité de l'argent est 10,47, celle de l'or 19,26. (*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 33. — Un morceau de bois dont la densité est 0,729 a la forme d'un cône droit ; on le fait flotter sur l'eau de manière que l'axe du cône soit vertical, en mettant d'abord le sommet en bas, puis le sommet en haut. On demande dans chaque cas quelle est la fraction de la hauteur du cône qui s'enfoncera dans l'eau.

PROBLÈME 34. — La perte de poids éprouvée par un corps solide est de 10 grammes quand on le plonge dans l'eau, de $18^{gr},4$ quand on le plonge dans l'acide sulfurique, de $15^{gr},73$ quand on le plonge dans un mélange formé de 3 parties d'eau et de 5 parties d'acide sulfurique. On demande de montrer qu'il y a eu contraction au moment du mélange et de déterminer la valeur de cette contraction.

PROBLÈME 35. — On fabrique avec de l'or, dont la densité est 19,362, des feuilles qui ont 10 millièmes de millimètre. Quelle surface pourrait-on couvrir avec 3 grammes d'or ? (*Paris*, 1855.)

PROBLÈME 36.— Quelle est la longueur du cylindre de platine que l'on doit fixer

au bout d'un cylindre d'acier de 2 décimètres de long, pour que le système se soutienne verticalement dans le mercure lorsque la base supérieure du cylindre d'acier sera à 3 centimètres au-dessus du niveau du mercure?

Densité du platine..................................	= 21,12
— de l'acier	= 7,8
— du mercure..................................	= 13,6

(*Poitiers*, 1855.)

Ce problème se rapporte à l'appareil décrit au § 972.

Problème 37. — Quel est le diamètre d'un fil de platine qui pèse 27 grammes par mètre de longueur? On prendra pour densité du platine 21,53.
(*Paris*, 1855.)

Problème 38. — Un baromètre à siphon, dont les deux branches ont le même diamètre, marque 760 millimètres. On le plonge dans un liquide dont la densité par rapport à l'eau est 0,9; le sommet de la colonne barométrique s'élève de 10 millimètres au-dessus de sa position primitive. On demande quelle est la hauteur du liquide au-dessus du niveau du mercure dans la branche ouverte. Le liquide et le mercure sont à 0°, et la pression extérieure ne change pas pendant l'expérience. (Concours général, 1848.)

Problème 39. — Une couronne pesant 300 grammes est formée d'or ou d'argent, ou bien d'un alliage de ces deux métaux; on la pèse dans l'eau et l'on trouve qu'elle a perdu 20 grammes de son poids; on demande quelle est la composition de la couronne, sachant que la densité de l'or est 19,5 et celle de l'argent 10,5. (*Paris*, 1858.)

On suppose ici que l'alliage s'est opéré sans changement de volume: ce qui n'est pas tout à fait exact.

Problème 40. — Un vase de verre plein de mercure pèse 54gr,643 dans l'air; il pèse 45gr,732 dans l'eau. Quel est le poids du mercure contenu dans le vase? Quel est le poids du verre?

Poids spécifique du mercure..............................	= 13,56
— du verre.	= 2,5

C'est en résolvant ce problème que l'on peut obtenir le poids de mercure contenu dans un thermomètre déjà construit: question importante pour la détermination des chaleurs spécifiques (§ 453).

Problème 41. — Il s'est déclaré à fond de cale d'un navire une voie d'eau de forme circulaire et d'un rayon de 0m,1. La hauteur verticale de l'eau depuis son niveau extérieur jusqu'au centre de l'ouverture est de 3m,03. L'eau de mer a une densité 1,026. On demande, à un hectogramme près, le poids qu'il faudrait maintenir sur le tampon, qui bouche cette voie, pour empêcher l'eau d'entrer.
(*Paris*, 1858.)

Problème 42. — Pour exploiter une mine de sel gemme, on a percé dans un terrain salifère un trou de sonde dans lequel on a introduit un tuyau de 100 mètres de long, qui ne remplit pas exactement l'ouverture et qui dépasse le sol de 1 mètre ; il plonge de $0^m,75$ dans une dissolution saline dont la densité est 1,3 ; on verse de l'eau douce dans l'intervalle qui sépare le tuyau des parois du trou de sonde. On demande à quelle hauteur la dissolution s'élèvera dans le tuyau. (*Paris*, 1853.)

Problème 43. — Un fragment de métal pèse dans l'air $7^{gr},234$; dans l'eau, $4^{gr},253$; dans un liquide A, $5^{gr},417$; dans un liquide B, $3^{gr},215$. On demande la densité du métal et celle de chacun des liquides A et B par rapport à l'eau. (*Paris*, 1855.)

Problème 44. — Un corps dont la densité est $\frac{5}{9}$, pèse $60^{gr},27$ dans l'air à 0°. Plongé dans un liquide à 0°, il ne pèse plus que $40^{gr},65$. Quelle est la densité de ce liquide ?

On sait que 1 litre d'air sec à 0° pèse $1^{gr},3$. (*Toulouse*, 1854.)

Problème 45. — La densité de la substance qui forme un triangle pesant est 2,40 ; sa hauteur $0^m,35$. On le plonge parallèlement à sa base dans un liquide dont la densité est 3,28. On demande la hauteur du trapèze immergé, quand le triangle est en équilibre : on suppose le triangle assez mince pour pouvoir en négliger l'épaisseur.

Problème 46. — L'une des branches d'un siphon renversé est remplie de mercure jusqu'à $0^m,275$ au-dessus du canal de communication ; l'autre branche est remplie d'un liquide jusqu'à $1^m,42$. Ces deux colonnes se font équilibre. On demande la densité du dernier liquide par rapport au mercure et à l'eau. (*Paris*, 1855.)

Problème 47. — On a un cylindre de bois de 3 décimètres de longueur ; le poids spécifique du bois est 0,65 ; on ajoute à la partie inférieure un cylindre de fer de $0^m,01$ de longueur, dont le poids spécifique est 8. On demande : 1° de quelle longueur plongent les deux cylindres dans un vase plein d'eau ; 2° si le centre de poussée est placé au-dessus ou au-dessous du centre de gravité. (*Nancy*, 1860.)

Problème 48. — Un morceau de liége verni pèse 30 grammes dans l'air. Une boule de plomb pèse 110 grammes dans l'eau. Le liége et le plomb liés ensemble, suspendus par un fil à l'un des plateaux d'une balance et plongés entièrement dans l'eau, ne pèsent plus que 15 grammes.

Quel est le poids spécifique du liége ? (*Paris*, 1859.)

Problème 49. — On veut lester un cylindre de bois de longueur égale à 1 mètre, de manière à ce qu'il affleure dans l'eau jusqu'à sa partie supérieure. On prend pour lest un cylindre de platine de même section droite que le cylin-

dre de bois, de façon à ce qu'il en soit le prolongement, la densité du bois est 0,5; celle du platine est 21,5. On demande quelle longueur il faut donner au cylindre de platine pour satisfaire à la condition énoncée. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 50. — Un aréomètre de Baumé à tige cylindrique marque 0° dans l'eau pure, et 66° dans un liquide dont le poids spécifique est 1,8. On demande quel sera le nouveau point d'affleurement dans le liquide dont le poids spécifique est 1,8, si l'aréomètre, tout en restant semblable, se contracte de la 10e partie de son volume. (CONCOURS D'ADMISSION *à l'École normale*, 1858.)

SECTION IV

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. — BAROMÈTRE

Dans les problèmes, qui concernent le baromètre, on a généralement à passer de la pression atmosphérique, représentée par une colonne de mercure, à la valeur effective de cette pression exprimée en kilogrammes, quand elle s'exerce sur une surface donnée. La question se ramène dans tous les cas à déterminer quel est le poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la surface choisie, et pour hauteur la hauteur barométrique au moment voulu.

PROBLÈME 51. — Trouver la valeur numérique de la pression qu'exerce l'atmosphère sur un rectangle dont un côté est égal à $0^m,14$ et la diagonale à $0^m,26$. On suppose que la hauteur barométrique est égale à $0^m,76$ et la température à 0°. (*Paris*, 1855.)

Solution. — Prenons le centimètre pour unité. L'aire de ce rectangle sera égale à

$$14 \times \sqrt{26^2 - 14^2} \quad \text{ou} \quad 306,6 \text{ centimètres carrés.}$$

Or, une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur et de 1 centimètre carré de base, pèse $1^k,033$ (§ 150); donc la pression sur le rectangle donné sera

$$306,6 \times 1^{kil},033 \quad \text{ou} \quad 316^{kil},7.$$

PROBLÈME 52. — Trouver la valeur numérique de la pression que l'atmosphère exerce sur la surface d'un cercle, le diamètre étant égal à $0^m,75$; on suppose que la pression barométrique égale $0^m,74$. (*Paris*, 1855.)

PROBLÈME 53. — La pression atmosphérique étant 733 millimètres, on demande par quel nombre elle serait indiquée dans un baromètre construit avec de l'acide sulfurique, sachant que la densité du mercure est 13,59 et celle de l'acide sulfurique 1,841.

PROBLÈME 54. — Le tube d'un baromètre à cuvette a un diamètre de $2^{mm},5$, la

cuvette dans laquelle il est plongé est exactement cylindrique comme le tube. On demande quel doit être le diamètre de cette cuvette pour que, dans le cas d'une variation de 5 centimètres dans la pression atmosphérique, il n'y ait qu'un changement de hauteur de $\frac{1}{10}$ de millimètre, dans le niveau du mercure de la cuvette. On ne tiendra pas compte de l'épaisseur des parois du tube.

Problème 55. — Les deux branches cylindriques d'un baromètre à siphon, ont des diamètres inégaux ; celui de la petite branche est 7 fois plus grand que celui de la grande. On place le zéro de la graduation au point où le mercure affleure dans la petite branche quand la pression est 760, et l'on demande quelle est la variation de ce niveau au-dessus ou au-dessous de zéro, quand la pression devient 735 ou 785 millimètres.

Problème 56. — Au lieu d'un tube de verre, on a employé pour la construction du baromètre un tube en fer creux. Ce dernier est suspendu verticalement par son extrémité supérieure qui est fermée, au-dessous de l'un des plateaux d'une balance sensible, tandis que son extrémité inférieure ouverte plonge dans le mercure d'une large cuvette. On fait équilibre à ce système avec des poids gradués placés dans l'autre bassin de la balance. On demande d'expliquer comment, dans ces conditions, l'appareil pourra servir à mesurer la pression atmosphérique ; quels seront ses avantages, ses inconvénients ; par quelle particularité de construction on peut en faire un appareil doué d'une grande sensibilité.

Ce baromètre est employé par le P. Secchi, directeur de l'Observatoire romain.

Problème 57. — Un baromètre à siphon dont les deux branches ont le même diamètre, marque à Paris 760 millimètres, le mercure et l'air étant à une même température connue t ; à ce moment, on ferme la petite branche à la lampe, de manière à la clore hermétiquement. On transporte le baromètre à l'équateur, on le replace dans un milieu qui a exactement la température t et l'on demande de prévoir à l'avance quelle sera la hauteur barométrique indiquée cette fois par l'appareil. Le rayon du tube est $1^{mm},5$ et la longueur de la chambre à air placée au-dessus du mercure dans la petite branche était à Paris de $0^{m},1$. On sait que l'accélération de la pesanteur à Paris est de $9^{m},8088$ et à l'équateur de $9^{m},7833$.

Problème 58. — Le baromètre marque 760 millimètres. On demande quelle est en kilogrammes la valeur de l'effort nécessaire pour séparer les deux hémisphères de Magdebourg dans l'intérieur desquels la force élastique de l'air a été ramenée à 12 millimètres. On donne le rayon des hémisphères, $0^{m},1$ et le poids spécifique du mercure, 13,596.

SECTION V

LOI DE MARIOTTE. — LOI DU MÉLANGE DES GAZ ET APPLICATIONS

C'est toujours la même marche qui est suivie pour résoudre les problèmes qui se rapportent à la loi de Mariotte. On représente les inconnues de la question par des lettres et on écrit, en se servant de ces lettres comme des nombres fournis par l'énoncé, que le produit du volume de la masse gazeuse par la pression qu'elle supporte est constant.

$$V_0H_0 = V_1H_1.$$

Cette égalité, nous l'avons vu (§ 173), est la traduction, en langage algébrique, de la loi de Mariotte.

Quand il s'agit d'un mélange de plusieurs gaz, c'est la formule

$$V'''H''' = VH + V'H' + V''H'' \quad (\S\ 177)$$

qui doit être employée.

Problème 59. — Un vase à parois élastiques contient $6^{lit},354$ d'air sous la pression de $0^m,76$. Déterminer le volume de cet air à la pression de $0^m,64$, la température restant constante. (*Nancy*, 1857.)

Solution. — Cette question se résout en appliquant de suite la loi de Mariotte. Si l'on appelle x le volume cherché on a :

$$6,354 \times 76 = 64\,x$$

$$x = \frac{6,354 \times 76}{64} = 7,545$$

On peut aussi raisonner de la manière suivante : Si la pression devenait 1 centimètre, c'est-à-dire 76 fois plus petite que la pression primitive, le volume deviendrait 76 fois plus grand ou $6,354 \times 76$. Cette pression réduite à 1 centimètre devient-elle égale à la pression finale, qui est 64 fois plus grande, le volume cherché sera 64 fois plus petit ou

$$\frac{6,354 \times 76}{64} = 7,545$$

Problème 60. — Un tube barométrique, plongé verticalement dans une cuvette profonde, renferme de l'air sec dans sa partie supérieure. Le volume de cet air est de 3 centimètres cubes et la hauteur du mercure dans le tube au-dessus du niveau dans la cuvette est de 588 millimètres. On soulève le tube jusqu'à ce que l'air de la chambre barométrique occupe 4 centimètres cubes. La hauteur

du mercure dans le tube est alors de 630 millimètres. On demande quelle est la pression extérieure. (*Poitiers*, 1859.)

Le volume de l'air devient dans la seconde expérience les $\frac{4}{3}$ du premier volume, donc sa force élastique est devenue les $\frac{3}{4}$ de la force élastique primitive. Elle a donc diminué du quart de ce qu'elle était précédemment. Mais alors le mercure s'est élevé de $630^{mm} - 588^{mm} = 42^{mm}$ qui ont remplacé cette force élastique supprimée. Ainsi le quart de la pression exercée primitivement par l'air est égal à 42^{mm}; la force élastique totale était donc $42^{mm} \times 4 = 168^{mm}$ et la pression atmosphérique était de $588^{mm} + 168^{mm} = 756^{mm}$.

Autre solution. — Soit x la pression atmosphérique : dans le premier cas on peut écrire

$$x = 588 + y \qquad \text{ou } y = x - 588$$

en appelant y la force élastique de l'air contenu dans la chambre barométrique. Dans le second on a

$$x = 630 + \frac{3}{4}y = 630 + \frac{3}{4}x - \frac{3}{4}588$$

$$4x = 630 \times 4 + 3x - 3 \times 588$$

$$x = 630 \times 4 - 588 \times 3 = 756^{mm}$$

Problème 61. — Un récipient plein d'air à la pression de 77^{cm} est ajusté, à l'aide d'une monture à robinet, à la partie supérieure d'un baromètre à cuvette ; tout le tube a une section de 20 centimètres carrés, et une longueur de 90 centimètres. La pression extérieure est de 75^{cm}. On ouvre le robinet, et le mercure tombe dans le baromètre à 40 centimètres du niveau dans la cuvette. On demande quelle est la capacité du récipient. La longueur du tube barométrique se compte à partir du niveau de la cuvette, lequel est supposé invariable. La température est aussi invariable pendant l'expérience. (*Paris*, 1858.)

Solution. — Appelons x la capacité du récipient évaluée en centimètres cubes.

A l'origine, l'air du récipient occupe un volume x sous la pression 77^c.

Lorsque le robinet est ouvert, cet air occupe un volume $x + (90 - 40) \times 20$ sous la pression $75 - 40 = 35^c$.

On a donc:

$$77x = 35 \times (x + 20 \times 50)$$

$$42x = 35000 \text{ et, } x = \frac{35000}{42} = 833 \text{ cent. cubes.}$$

Problème 62. — On a un ballon plein d'air sous la pression indiquée par le baromètre ; on y fait le vide ou plutôt on réduit l'élasticité à être seulement x, et l'on y fait entrer de l'hydrogène pour établir la pression barométrique. On réduit de nouveau l'élasticité du mélange au même point x, et on fait de nouveau rentrer de l'hydrogène pour établir la même pression initiale. Il arrive après cette dernière opération que le ballon contient un mélange dans lequel

le poids de l'air est 1 millième du poids de l'hydrogène. On demande quelle est la valeur de x à $\frac{1}{10}$ de millimètre près.

La température est constante et le baromètre se maintient à 75^{cm} de hauteur. La densité de l'hydrogène par rapport à l'air est 0,0691.

(CONCOURS GÉNÉRAL, 1850.)

Solution. — Après la première opération, l'air contenu dans le ballon conserve une force élastique x. Par la seconde opération, cette force élastique se trouve réduite : elle n'est plus que $x \times \frac{x}{75} = \frac{x^2}{75}$. Par conséquent, la force élastique de l'hydrogène est $75 - \frac{x^2}{75} = \frac{75^2 - x^2}{75}$, et le rapport des forces élastiques des deux gaz est devenu $\frac{75^2 - x^2}{x^2}$. Ce rapport serait celui de leurs poids, si les deux gaz avaient même densité ; mais comme la densité de l'hydrogène est les 0,0691 de celle de l'air, il faut, pour avoir le rapport des poids, multiplier l'expression précédente par 0,0691.

$$\frac{75^2 - x^2}{x^2}\, 0{,}0691 = 1000$$

$$x = 0^{cm},62$$

PROBLÈME 63. — Trouver la loi suivant laquelle décroît la force élastique de l'air dans le récipient d'une machine pneumatique en tenant compte de l'espace nuisible (§ 199). On donne le volume V du récipient, v celui du corps de pompe, u celui de l'espace nuisible, la pression initiale H.

Solution. — Appelons $H_1, H_2, \ldots H_n$ la pression de l'air, après le premier, le second, le n^e coup de piston.

Pour déterminer l'effet produit par le premier coup de piston, écrivons les conditions de la question :

Volume initial de l'air...........	$(V + u)$	Pression initiale.........	H
Volume de la même masse gazeuse quand le piston est au haut de sa course....................	$(V + v)$	Pression correspondante..	H_1

On a donc :

$$(V + u)\, H = (V + v)\, H_1 \quad \text{d'où} \quad H_1 = \frac{V}{V + v}\, H + \frac{u}{V + v}\, H.$$

La pression totale après le second coup de piston déterminée, comme nous venons de le faire déjà, sera :

$$H_2 = \frac{V}{V + v}\, H_1 + \frac{u}{V + v}\, H;$$

de même après le troisième

$$H_3 = \frac{V}{V + r}\, H_2 + \frac{u}{V + v}\, H;$$

après le n^e

$$H_n = \frac{V}{V+v} H_{n-1} + \frac{u}{V+v} H.$$

De ces égalités l'on tire en éliminant H_1, H_2, etc. :

$$H_n = \left(\frac{V}{V+v}\right)^n H + \frac{u}{V+v} H \left\{ \left(\frac{V}{V+v}\right)^{n-1} + \left(\frac{V}{V+v}\right)^{n-2} + \ldots\ldots + 1 \right\}.$$

La quantité entre parenthèses est la somme des termes d'une progression géométrique dont la raison est $\frac{V}{V+v}$; en substituant et en réduisant il vient

$$H_n = \left(\frac{V}{V+v}\right)^n H + \frac{u}{v}\left[1 - \left(\frac{V}{V+v}\right)^n\right] H.$$

Telle est la loi véritable de la raréfaction de l'air dans le récipient de la machine pneumatique. On peut voir comme vérification que si l'on ne tient pas compte de l'espace nuisible, c'est-à-dire que si l'on fait $u = 0$, on retombe sur la loi ordinaire que nous avons donnée au § 197.

$$H_n = \left(\frac{V}{V+v}\right)^n H.$$

De même on en déduit la valeur limite de H_n qui exprime le pouvoir raréfiant de la machine; il suffit de faire $n = \infty$, on a :

$$H_n = \frac{u}{v} H.$$

c'est la valeur donnée au § 198.

PROBLÈME 64. — Un tube barométrique, purgé d'humidité mais non privé d'air, est dressé sur une cuve à mercure. La hauteur de la colonne de ce liquide dans le tube au-dessus du niveau dans la cuve est $h = 0^m,552$. On introduit dans le tube barométrique autant d'air qu'il y en a déjà ; la chambre barométrique augmente de moitié et la hauteur de la colonne mercurielle diminue de $h' = 0^m,072$. On demande quelle est la pression atmosphérique x sous laquelle on opère. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1852.)

PROBLÈME 65. — La petite branche d'un tube de Mariotte a un volume de 20 centimètres cubes quand le mercure est au même niveau dans les deux branches. On verse, dans la grande branche, du mercure, jusqu'à ce que l'air de la petite branche occupe un volume de 3 centimètres cubes.

On demande la différence des niveaux du mercure dans les deux branches; la pression extérieure est $0^m,760$.

PROBLÈME 66. — On verse du mercure dans un tube barométrique, en laissant 15 centimètres cubes d'air sec sous la pression extérieure. Le tube est renversé dans une cuvette pleine de mercure; quand il est vertical, l'air y occupe

un volume de 25 centimètres cubes. La colonne mercurielle, qui reste en suspension dans le tube, a alors 302 millimètres.

Quelle est la pression extérieure actuelle ? (*Poitiers*, 1860.)

PROBLÈME 67. — Un tube reposant sur une cuve à mercure contient une colonne d'air de 1m,85, à la pression de 0m,75 ; on demande la pression qu'il faudra exercer sur le mercure pour que la colonne se réduise à 0m,35.

(*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 68. — Dans un tube barométrique qui plonge dans une cuvette profonde, le mercure s'élève à 743 millimètres au-dessus du niveau de la cuvette. On enfonce le tube jusqu'à ce que la chambre barométrique, qui contient de l'air, soit réduite au tiers de son volume primitif. La hauteur du mercure est alors de 701 millimètres. Quelle est, d'après ces deux observations, la pression extérieure actuelle ? (*Poitiers*, 1858.)

PROBLÈME 69. — Une éprouvette cylindrique à fond plat, ayant à l'intérieur une longueur l, est originairement pleine d'air sous la pression atmosphérique p. On l'enfonce verticalement dans le mercure en ayant soin de tenir l'ouverture tournée vers le bas. On demande à quelle pression le gaz intérieur sera soumis lorsque le plan de l'ouverture se trouvera à une distance h du niveau du mercure dans le réservoir qui sert à l'expérience. On néglige les effets de la capillarité.

On examinera en particulier les cas où $l=0^m,2$; $p=0^m,76$, et $h=1$ mètre.

PROBLÈME 70. — Le volume d'air de l'éprouvette d'une machine de compression est de 137 parties; par le jeu de la machine, ce volume s'est réduit à 25 parties, et le mercure s'est élevé dans l'éprouvette à 0m,45. On demande le rapport entre la quantité primitive d'air du récipient et la quantité qui s'y trouve après l'expérience. (*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 71. — Un manomètre est divisé en 110 parties d'égale capacité : quand la pression extérieure est 0m,76, le mercure dans l'intérieur de l'éprouvette et dans le bain se tient au zéro de l'échelle. On porte le manomètre dans une machine où l'on comprime l'air ; et l'on voit le mercure s'élever jusqu'à la 80e division, puis on mesure la hauteur du mercure dans le tube, et on la trouve de 0m,15. On demande la pression dans la machine.

(*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 72. — Un flacon entièrement clos, d'une capacité de 3 litres, est rempli aux deux tiers d'une solution, saturée sous la pression normale d'acide carbonique dans l'eau. Au-dessus du liquide est de l'air atmosphérique à la pression de 0m,760. On agite plusieurs fois le flacon, on le laisse reposer pendant plusieurs heures, et on demande de déduire la composition de l'atmosphère du flacon de la connaissance des coefficients de solubilité : de l'acide carbonique, 1,797; de l'azote, 0,020; de l'oxygène, 0,041.

On suppose que la température est invariablement 0°.

PROBLÈME 73. — Un ballon en verre, muni d'un robinet, contient de l'air sec à la pression de $0^m,20$, on y laisse rentrer de l'hydrogène sec de manière que la pression du mélange devienne $0^m,76$, on fait ensuite le vide dans le ballon dans le but de ramener de nouveau le mélange à la pression initiale de $0^m,20$. On laisse encore cette fois rentrer de l'hydrogène ; la pression redevient $0^m,76$. On demande quelle est la composition centésimale en volume du dernier mélange ainsi constitué.

PROBLÈME 74. — On donne un récipient de 3 litres de capacité, on y introduit 2 litres d'hydrogène à la pression de $1^m,30$, 1 litre d'acide carbonique à la pression de $0^m,25$, 3 litres d'azote à la pression de $0^m,25$. On demande quelle sera la pression finale du mélange. (*Paris*, 1853.)

PROBLÈME 75. — La cloche d'une machine pneumatique renferme $3^{lit},17$ d'air ; un tube barométrique recourbé communiquant d'une part avec la partie supérieure de cette cloche et plongeant d'autre part dans un bain de mercure marque 0 quand la cloche est en communication avec l'air ; on ferme la cloche et on fait jouer la machine : le mercure s'élève dans le tube à $0^m,65$. Un baromètre placé dans la chambre où se fait l'expérience est resté à $0^m,76$ pendant toute sa durée. On demande combien on a retiré d'air de la cloche et combien il en reste sous la cloche. On suppose que la température qui était 0° n'a pas varié. (*Paris*, 1853.)

PROBLÈME 76. — On fait jouer le piston d'une machine pneumatique ; la cloche est d'une capacité de $7^{lit},53$, elle est remplie d'air à la pression de 0,76. On demande le poids de l'air lorsque la pression est réduite à 0,21, le poids de l'air enlevé, et le poids du volume d'air qui reste dans la cloche si on élève la température de 0° à 15°. On sait qu'un litre d'air pèse $1^{gr},3$ et que le coefficient de dilatation de l'air est 0,00366. (*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 77. — Deux tubes cylindriques verticaux de même section peuvent être mis en communication par un conduit à robinet qui débouche à la partie inférieure de l'un et de l'autre.

L'un de ces tubes est fermé à sa partie supérieure ; il a 1 mètre de long et renferme une couche d'air de 25 centimètres d'épaisseur soumise à la pression atmosphérique et une couche de mercure ayant 75 centimètres d'épaisseur ; le robinet de communication est d'abord fermé et le conduit plein de mercure. On ouvre le robinet : une partie du mercure passe dans le deuxième tube, lequel est ouvert dans l'air à la partie supérieure ; bientôt l'équilibre s'établit. On demande alors quelle est la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes ; les fonds de ces tubes sont dans un même plan horizontal. La pression extérieure est 0,75. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1861.)

PROBLÈME 78. — Un cylindre vertical de 1 décimètre de diamètre et de 3 décimètres de hauteur communique par sa partie inférieure avec un tube de 1 centimètre de diamètre qui se recourbe et s'élève verticalement à une hau-

teur suffisante. Ce tube est ouvert à sa partie supérieure, le cylindre est fermé et il contient un volume égal d'air et de mercure, l'air s'y trouve sous la pression atmosphérique de telle sorte que le mercure est au même niveau dans le cylindre et dans le tube ; alors, avec une pompe de compression, l'on introduit de l'air dans le cylindre, le niveau du mercure s'y abaisse tandis qu'il s'élève dans le tube ouvert, on continue cette opération jusqu'à ce que le niveau du mercure soit abaissé de 10 centimètres dans le cylindre, et l'on demande : 1° quel est le poids de l'air qui a été introduit ; 2° quelle est en kilogrammes la pression qui s'est ajoutée à celle que supportait primitivement la surface du mercure dans le cylindre. On suppose que le thermomètre s'est maintenu à zéro et le baromètre à $0^m,76$. (Concours général, 1847.)

Problème 79. — Un manomètre est composé de deux branches verticales cylindriques de même hauteur et de même diamètre : l'une est fermée, l'autre est munie d'un robinet pour être mise en communication, soit avec une machine pneumatique, soit avec une machine de compression. L'appareil est disposé de telle sorte que le mercure qui en remplit la partie inférieure soit au même niveau dans les deux branches quand la pression est d'une atmosphère et quand en même temps l'air occupe dans la branche fermée une longueur de 50 centimètres. La température étant constante, on demande :

1° Quelle doit être la hauteur de l'appareil pour que l'air de la branche fermée ne puisse pas passer dans la branche à robinet même quand on y fait le vide au-dessus du mercure ;

2° Quelles sont les pressions de l'air dans la branche à robinet lorsque l'air de la branche fermée occupe les longueurs de 10, 30, 60 et 70 centimètres ? (Concours général, 1846.)

Problème 80. — Un manomètre à air comprimé, destiné à mesurer la pression d'un gaz, se compose d'un tube vertical cylindrique et d'une cuvette pareillement cylindrique, la cuvette a un diamètre intérieur de 5 centimètres ; le tube, coupé horizontalement à son extrémité inférieure, a 3 centimètres de diamètre extérieur et 1 centimètre de diamètre intérieur, et 40 centimètres de hauteur verticale intérieure. Il est fixé dans la cuvette, de telle sorte que l'air du tube et le gaz de la cuvette étant l'un et l'autre sous la pression d'une atmosphère, l'extrémité inférieure du tube plonge de 2 centimètres au-dessous du niveau du mercure dans la cuvette.

On demande : 1° quelle sera la pression de l'air du manomètre ; 2° quelle sera la pression du gaz de la cuvette lorsque le niveau du mercure dans celle-ci, refoulé par la pression, sera descendu au point d'affleurer l'extrémité inférieure du tube.

On suppose que l'air et le gaz ne changent pas de température et que dans leur compression ils suivent la loi de Mariotte. (Concours général, 1849.)

Problème 81. — Un siphon destiné à transvaser de l'eau est formé par un tube cylindrique en verre deux fois recourbé à angle droit. La petite branche verticale plonge dans l'eau et est remplie d'air sous la pression extérieure $0^m,76$;

sa hauteur au-dessus du niveau de l'eau est de $0^m,25$; la partie horizontale du siphon, dont la longueur est de $0^m,12$, et la grande branche sont remplies d'eau. On demande quelle est la longueur minimum que doit avoir cette grande branche, pour qu'en débouchant son ouverture inférieure, le siphon s'amorce de lui-même.

SECTION VI

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE APPLIQUÉ AUX GAZ. — AÉROSTATS

Le mode de solution de ces problèmes est tout à fait analogue à celui qui a déjà été indiqué pour la troisième section. Il faut toujours écrire que lorsqu'un corps plongé dans un gaz est en équilibre, son poids absolu est le même que celui d'un volume du gaz égal au volume du corps. Ce dernier poids doit être d'ailleurs estimé en tenant compte des conditions actuelles de température et de pression où se trouve le fluide élastique. Quand il s'agit des aérostats, l'équation du problème s'obtient en exprimant que la force ascensionnelle est égale à la différence entre le poids de l'air déplacé par le ballon et le poids total du ballon et de ses annexes. (Voir § 187.)

Problème 82. — Pour faire équilibre au poids d'un lingot de platine placé dans le plateau d'une balance, on a placé dans l'autre plateau un poids de 27 grammes en cuivre jaune, combien aurait-il fallu en mettre si cette pesée avait été faite dans le vide? On sait que le poids spécifique du platine est 22, celui du cuivre jaune 8,3, celui de l'air à 0° et sous la pression $0^m,76$ (conditions de température et de pression dans lesquelles on opère) est 0,0013.

(*Paris*, 1855.)

Solution. — Soit x le poids absolu du lingot, $\frac{x}{22}$ sera son volume; $\frac{x}{22} \times 0,0013$ sera le poids du volume d'air déplacé, donc la pression exercée actuellement par le lingot sur le plateau de la balance est

$$x\left(1 - \frac{0,0013}{22}\right),$$

de même la pression effective exercée dans l'air par les poids gradués sur l'autre plateau est :

$$27\left(1 - \frac{0,0013}{8,3}\right).$$

On aura donc

$$x\left(1 - \frac{0,0013}{22}\right) = 27\left(1 - \frac{0,0013}{8,3}\right)$$

d'où

$$x = 27\left(\frac{(8,3 - 0,0013)22}{(22 - 0,0013)8,3}\right) = 26^{gr},997.$$

Ainsi, dans le vide, il eût fallu mettre sur le plateau de la balance $26^{gr},997$, en admettant *comme exacts* les poids spécifiques donnés pour le cuivre et le platine.

PROBLÈME 83. — On veut construire un aérostat capable d'enlever 1 250 kilogrammes avec une force ascensionnelle de 10 kilogrammes. On demande quel devra être son volume :

1° Pour le cas où l'on se servirait d'hydrogène pour le remplir ;

2° Pour le cas où l'on se servirait, à cet effet, de gaz de l'éclairage, d'une densité de 0,408.

On négligera dans le calcul le volume de l'enveloppe et celui de la nacelle.

On cherchera de plus, dans l'hypothèse où l'on se servirait d'hydrogène, combien il faut employer de zinc et d'acide sulfurique pour produire ce gaz.

(CONCOURS GÉNÉRAL, 1855.)

Solution. — Soit x le volume du ballon exprimé en mètres cubes; 1 mètre cube d'air sec à 0° et sous la pression $0^{m},76$ pèse $1^{kil},293$; donc 1 mètre cube d'hydrogène dans les mêmes conditions pèse $1^{kil},293 \times 0,0693$, car on sait que la densité de l'hydrogène par rapport à l'air est 0,0693. Le poids d'hydrogène contenu dans le ballon sera donc $x \times 1,293 \times 0,0693$. La masse totale qui s'élèvera dans l'air, aura donc pour poids : $(x \times 1,293 \times 0,0693 + 1\,250)$ kilogrammes. D'autre part, la poussée de l'air sera $x \times 1,293$. La force ascensionnelle sera la différence entre la poussée et le poids total. On aura donc :

$$x \times 1,293 - x \times 1,293 \times 0,0693 - 1250 = 10,$$

d'où

$$x = \frac{1260}{1,293(1 - 0,0693)} = 1047^{mc}.$$

Si le ballon est gonflé avec le gaz de l'éclairage dont la densité est 0,408, comme le poids d'un mètre cube de ce gaz est de $0^{kil},527$, on aura cette fois pour le volume y du ballon :

$$y = \frac{1260}{1,293(1 - 0,408)} = 1645.$$

Le poids d'hydrogène nécessaire pour remplir le ballon est

$$1047 \times 1,293 \times 0,0693 = 94^{kil}.$$

Comme l'équivalent du zinc rapporté à celui de l'hydrogène est 33, il faudra, pour préparer cet hydrogène, un poids z de zinc égal à

$$(94 \times 33) ; \quad \text{d'où} \quad z = 3102^{kil}.$$

Enfin l'équivalent de l'acide sulfurique monohydraté étant 49, le poids u de cet acide qu'il faudra employer sera égal à

$$(94 \times 49) ; \quad \text{d'où} \quad u = 4606^{kil}.$$

PROBLÈME 84. — Dans les conditions normales de pression et de température, le litre d'air pèse $1_{gr},293$; ceci posé, on demande ce que pèsera dans l'air, dans ces conditions, un demi-mètre cube de bois de densité égale à $\frac{4}{5}$. On demande en outre quel serait le côté d'un cube de laiton de densité égale à 8,3, qui dans l'air pèserait autant que ce demi-mètre cube de bois. (*Paris*, 1855.)

PROBLÈME 85. — Un morceau d'or pèse 3 kilogrammes dans le vide, on demande la valeur des poids apparents qu'on lui trouverait en le pesant d'abord dans l'air, puis dans l'eau, comme si on voulait en déterminer le poids spécifique. On admettra que dans les conditions de l'expérience le poids d'un litre d'air est $1^{gr},293$, celui d'un litre d'eau est 1 kilogramme; celui d'un litre d'or est $19^{kil},5$. Enfin, on supposera que les poids employés sont en laiton, de poids spécifique 8,4. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1855.)

PROBLÈME 86. — Un corps perd, dans l'air, 7 grammes de son poids. Combien perdra-t-il dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène, la densité de l'acide carbonique étant 1,526 et celle de l'hydrogène 0,0693? (*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 87. — Une boule de cire et une boule de platine suspendues dans l'air aux deux extrémités du fléau d'une balance, se font équilibre. Trouver le rapport des poids réels de ces deux boules? La densité du platine = 22; celle de la cire = 0,96, et celle de l'air = 0,0013. (*Poitiers*, 1859.)

PROBLÈME 88. — Un litre d'air sec à 0° sous la pression de $0^{m},76$ pèse $1^{gr},293$: ceci posé, on demande quelle perte de poids éprouve, par l'effet de son immersion dans l'air sec à 20°, sous la pression de 0,74, un morceau de verre massif du poids de 20 kilogrammes. Le poids spécifique du verre à 0° est 2,49; le coefficient de dilatation cubique de ce corps est $\frac{1}{38700}$; le coefficient de dilatation du gaz est 0,00367. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 89. — On veut avoir 150 grammes de mercure, on fait la pesée dans l'air; on demande quels sont les poids de laiton qu'il faudra placer dans le plateau de la balance pour obtenir dans le vide les 150 grammes de mercure. La pression, le jour de l'expérience, est de 735 millimètres. Le poids spécifique du laiton est 8,39, celui du mercure 13,596.

PROBLÈME 90. — Sous le récipient d'une machine pneumatique contenant de l'air sec à 0° et sous la pression de $0^{m},76$, on place un fléau de balance aux extrémités duquel sont suspendus deux cubes. L'un a 3 centimètres de côté et pèse $26^{gr},324$, l'autre a 5 centimètres de côté et pèse $26^{gr},2597$. Par suite de cette inégalité de poids, le fléau n'est pas en équilibre. On fait le vide dans l'appareil et, on demande quelle pression indiquera l'éprouvette de la machine quand l'équilibre sera rétabli. On suppose d'ailleurs que la température de l'air est restée constante et que les deux bras du fléau sont d'égal volume. On sait de plus que le poids d'un litre d'air sec à 0° et sous la pression de $0^{m},76$ est de $1^{gr},293$. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 91. — Un corps pèse $33^{gr},9$ dans le vide et $32^{gr},8$ dans l'hydrogène, combien pèsera-t-il dans l'acide carbonique, sachant que le poids spécifique de l'hydrogène est 0,0693 et celui de l'acide carbonique 1,529 ?

PROBLÈME 92. — Calculer la force ascensionnelle d'un ballon sphérique de 5 mètres de rayon et rempli d'hydrogène pur, sachant que la densité de ce gaz est égale à 0,0693. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 93. — On propose de construire un ballon sphérique qui, plein d'hydrogène pur et sec à la température 0 et à la pression de $0^{m},76$ se trouve en équilibre au milieu de l'air ne tendant ni à monter ni à descendre. On suppose l'air à 0° et à la pression de $0^{m},76$ et l'on sait que, dans ces circonstances, il pèse $1^{gr},293$ par litre ; on sait de plus que la densité de l'hydrogène par rapport à l'air est 0,0693. On sait que le taffetas dont le ballon doit être fait pèse 240 grammes par mètre carré ; il s'agit de calculer le diamètre du ballon. Pour que la condition du problème soit satisfaite, on néglige la différence qui existe entre le volume de l'air intérieur et le volume de l'air déplacé. (*Paris*, 1857.)

PROBLÈME 94. — Calculer la force ascensionnelle d'un ballon sphérique qui, étant vide, pesait 78,54 et qui est rempli d'hydrogène impur. On suppose 1° que le taffetas verni du ballon pèse $0^{kil},250$ le mètre carré ; 2° que l'hydrogène impur dont on fait usage pèse $0^{kil},100$ le mètre cube ; que l'air atmosphérique pèse $1^{kil},30$ le mètre cube. (*Paris*, 1856.)

PROBLÈME 95. — On veut faire avec du taffetas verni qui pèse 250 grammes le mètre carré, un ballon propre à contenir $904^{mcc},78$ de ce gaz hydrogène. On demande le poids du taffetas employé. (*Paris*, 1855.)

PROBLÈME 96. — On demande quel doit être le rayon d'un ballon sphérique formé d'un taffetas qui pèse 250 grammes le mètre carré, pour que, plein d'hydrogène à 20° et à la pression de 0,75, il ait une force ascensionnelle nulle, lorsqu'il se trouve dans l'air sec à même température et à même pression.

Le litre d'air à zéro et sous la pression de $0^{m},76$ pèse $1^{gr},293$, et le poids spécifique de l'hydrogène rapporté à l'air est 0,0693. On sait d'ailleurs que le coefficient de dilatation est 0,00367. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1858.)

SECTION VII

DILATATION DES LIQUIDES, DES SOLIDES ET DES GAZ

Les problèmes sur les dilatations se résolvent en appliquant les formules qui ont été données dans le § 263 et les suivants, jusqu'au § 268. L'inconnue du

problème peut être le volume du corps à une certaine température, ou bien la température elle-même à laquelle ce volume atteint une certaine valeur, ou bien enfin le coefficient de dilatation de la substance. Quelquefois, la quantité que l'on veut obtenir est la densité d'un corps, densité qui dépend de la température dans les solides et dans les liquides, et en outre de la pression dans les gaz. Dans tous les cas, on applique les formules générales en introduisant à la place des lettres qui y sont contenues, soit les données numériques de la question, soit d'autres lettres qui représenteront les inconnues dont on cherche la valeur.

Quand il s'agira, dans un problème, d'un liquide qui se dilate dans un vase et qu'il faudra tenir compte de la variation de volume du vase, on évitera toute erreur en appliquant le principe général dont nous avons souvent tiré parti dans l'étude de la chaleur : *Le contenant dilaté est égal au contenu dilaté.*

Quand il s'agira d'estimer le poids d'un gaz dont on connaît le volume et la densité, on pourra multiplier le volume exprimé en litres par le poids spécifique du gaz *rapporté à celui de l'eau*, et alors le produit représentera le poids cherché en kilogrammes. Mais, comme on rapporte généralement la densité des gaz à celle de l'air, il vaudra mieux multiplier cette densité par le poids du litre d'air sec dans les mêmes conditions de température et de pression ; comme ce dernier poids est exprimé en grammes, le produit du nombre de litres qui représentera le volume du gaz, par le poids du litre de ce même gaz, donnera, en grammes, le poids cherché.

PROBLÈME 97. — Une barre de métal a 3 mètres de longueur, à la température de 12° ; on demande ses longueurs à 8° et à 40°.

Le coefficient de dilatation est $\frac{1}{1300}$. (*Paris*, 1858.)

Solution. — Si l'on désigne par l_0 la longueur de la barre à 0°, on aura de suite, d'après les règles connues :

$$l_0 = \frac{3}{1+\frac{12}{1300}},$$

d'où l'on tire l_8, l_{40}, qui expriment les longueurs à 8° et à 40°

$$l_8 = 3\left(\frac{1+\frac{8}{1300}}{1+\frac{12}{1300}}\right) = 3 \times \frac{1308}{1312} = 2{,}99.$$

$$l_{40} = 3 \times \frac{1340}{1312} = 3{,}06.$$

On prendrait, avec une approximation suffisante, les formules plus simples que nous avons indiquées § 264.

$$l_8 = 3\left(1+\frac{8-12}{1300}\right) = 3 \times \frac{1296}{1300} \text{ et } l_{40} = 3\left(1+\frac{40-12}{1300}\right) = 3 \times \frac{1328}{1300}.$$

Problème 98. — Un litre d'air pèse $1^{gr},29$ à $0°$ et sous la pression de 76^{cm} : on demande ce que serait le poids du même volume de gaz à la température de $15°$ et à la pression de 77^{cm}. Le coefficient de dilatation de l'air est 0,00366.

Solution. — La masse d'air qui à $0°$, sous la pression de 76^{cm}, occupait un litre, occupera $1 + 15 \times 0{,}00366$ à $15°$; et comme les volumes sont en raison inverse des pressions, ce volume deviendra à la pression 77

$$\frac{(1 + 15 \times 0{,}00366) \times 76}{77}.$$

D'un autre côté, nous savons que ce volume d'air pèse $1^{gr},29$; il suffira donc, pour avoir le poids d'un litre d'air à $15°$ et sous la pression 77, de diviser $1^{gr},29$ par

$$\frac{(1 + 15 \times 0{,}00366) \times 76}{77},$$

ce qui donne pour résultat :

$$\frac{1{,}29 \times 77}{1{,}0549 \times 76} = 1^{gr},24.$$

Ce qui revient en définitive, on le voit, à traduire en chiffres la formule générale (*e*) que nous avons démontrée § 267.

Problème 99. — On demande de déterminer la température x d'un bain liquide dans les conditions suivantes : Un thermomètre à mercure a son réservoir seulement plongé dans ce bain, tandis que sa tige est entourée d'eau froide dont la température θ est connue. Le mercure du thermomètre indique, par la position de l'extrémité de la colonne sur la graduation, une température T ; le nombre n des degrés qu'il occupe dans la tige se trouve à la température θ, tandis que le restant de la masse mercurielle est à la température x du bain. On donne le coefficient de dilatation apparente δ du mercure dans le verre employé.

Solution. — Prenons pour unité de volume, le volume d'une des divisions de la tige ; si le mercure qui remplit ces n divisions, au lieu d'être à θ, se trouvait à x, c'est-à-dire si le thermomètre tout entier était plongé dans le bain, le volume apparent de ce mercure s'accroîtrait de $n\delta(x-\theta)$, en prenant la formule approximative (*b*) (§ 264). Il suffira donc d'ajouter cet accroissement à T pour avoir la température cherchée. On aura alors

$$x = T + n\delta(x - \theta); \quad \text{d'où} \quad x = \frac{T - n\delta\theta}{1 - n\delta}.$$

Problème 100. — Un vase de verre renferme à $0°$ un morceau de fer du poids de 100 grammes, et en outre 120 grammes de mercure. Il est complétement plein. On chauffe à $100°$, et on demande quel est le poids du mercure qui sort.

La densité du fer à $0°$ est 7,78, son coefficient de dilatation cubique est $\frac{1}{28200}$;

la densité du mercure à 0° est 13,59; son coefficient de dilatation cubique est $\frac{1}{5550}$. Le coefficient de dilatation cubique du verre est $\frac{1}{38700}$. (*Paris*, 1858.)

Solution. — Nous allons écrire que le fer dilaté, plus le mercure qui reste dans le vase de verre, quand il est porté lui-même à la température de 100°, représentent un volume total égal à celui du vase dilaté.

Le volume du fer à 0° est

$$\frac{100}{7,78}\text{; à 100° il devient } \frac{100}{7,78}\left(1+\frac{1}{282}\right).$$

Le volume du mercure restant dans le vase est

$$\text{à 0° égal à } \frac{120-x}{13,59}\text{; à 100° } \frac{120-x}{13,59}\left(1+\frac{1}{55,5}\right)$$

en appelant x le poids de mercure qui est sorti.

Le volume du vase à 0° est égal à la somme du volume du fer et du mercure qui le remplissaient à 0° ou

$$\frac{100}{7,78}+\frac{120}{13,59}\text{; à 100°, il sera } \left(\frac{100}{7,78}+\frac{120}{13,59}\right)\left(1+\frac{1}{387}\right);$$

on aura donc l'égalité

$$\frac{100}{7,78}\left(1+\frac{1}{282}\right)+\frac{120-x}{13,59}\left(1+\frac{1}{55,5}\right)=\left(\frac{100}{7,78}+\frac{120}{13,59}\right)\left(1+\frac{1}{387}\right);$$

d'où

$$x = 1,9.$$

Il sortira donc à la température de 100° un poids de mercure égal à 1^{gr},9.

Problème 101. — Un tube de verre fermé par un bout et effilé à l'autre, tout à fait semblable pour la forme et les dimensions au réservoir d'un thermomètre à poids, est plongé dans une enceinte dont on veut déterminer la température, après avoir été, au préalable, rempli d'air sec. Quand il s'est mis en équilibre de température avec le milieu qui l'entoure, on ferme la pointe effilée à la lampe, et on note, en même temps, la hauteur barométrique H. Puis, on le dispose verticalement, au-dessus d'un bain de mercure, la pointe plongeant dans le bain; on casse celle-ci avec des pinces de manière à éviter toute rentrée d'air, et après avoir enveloppé le tube de glace fondante on mesure au cathétomètre la hauteur h du mercure soulevé dans le tube. Enfin on ferme la pointe avec la cire, on relève le tube pour évaluer le poids du mercure qui y est entré. — Soit p ce poids; on a d'avance mesuré le poids P du mercure qui à 0° le remplit complétement, on demande de déduire de ces données et de la connaissance des coefficients de ditatation de l'air et du verre α et K, la température de l'enceinte.

Solution. — Le volume d'air resté dans l'appareil chauffé à x^o est, lorsqu'on ramène cet air à 0° et à la pression (H — h):

$$\frac{P-p}{D_0};$$

D_0 étant la densité de mercure à 0°, cette même masse d'air a dû prendre à x^o et sous la pression H, le volume :

$$\left(\frac{P-p}{D_0}\right)\left(\frac{H-h}{H}\right)(1+\alpha x);$$

à cette même température le volume du contenant était devenu

$$\frac{P}{D_0}(1+Kx);$$

on aura donc

$$(P-p)\frac{H-h}{H}(1+\alpha x)=P(1+Kx);$$

d'où on déduira la valeur de x.

Un procédé de ce genre a été effectivement employé par Dulong pour mesurer des températures élevées.

Problème 102. — Étant donnée, une barre d'un métal de 2 mètres, sachant que ce métal a pour coefficient de dilatation $\frac{1}{1500}$, trouver l'allongement de la barre passant de 0° à 30° et sa longueur totale. (*Paris*, 1856.)

Problème 103. — Deux règles, l'une en fer, l'autre en cuivre, étant placées bout à bout, font une longueur totale de 1 mètre, à la température de 0°. Elles sont de même longueur à la température de 100°. Quelle est la longueur de chacune à la température de 0°? On l'évaluera à un dixième de millimètre près.

On prendra pour le coefficient de dilatation linéaire du fer 0,000012 ; pour celui du cuivre 0,000017. (*Toulouse.*)

Problème 104. — La longueur d'une barre de cuivre rouge à 25° est de 2^m,315. On demande quelle devra être la longueur d'une barre de fer à 0°, pour qu'à 60° la longueur de chaque barre soit devenue la même?

Coefficient de dilatation du fer = 0,0000122. Coefficient de dilatation du cuivre = 0,0000173. (*Nancy*, 1857.)

Problème 105. — On a un carré de 3 mètres à 0°; on porte sa température à 64°; calculer ce que devient sa surface en sachant que le coefficient de dilatation linéaire du fer est de 0,0000122. (*Paris*, 1853.)

Problème 106. — On suppose une barre métallique de 3 mètres de longueur,

ayant pour coefficient de dilatation $\frac{1}{75400}$; une autre barre de 5 mètres d'un autre métal se dilate autant que la première pour la même élévation de température ; quel est le coefficient de dilatation de ce métal ? (*Nancy*, 1858.)

Problème 107. — Le coefficient linéaire de la dilatation du fer est $\frac{1}{81900}$; celui du zinc, $\frac{1}{34000}$. On demande quelle sera la longueur d'une barre de zinc, qui se dilate autant pour le même accroissement de température, qu'une barre de fer de 2 mètres de longueur. (*Paris*, 6 août 1855.)

Problème 108. — Une règle de Borda est composée de deux règles, l'une de platine a une longueur de $1^m,5475$, et l'autre de cuivre a une longueur de $1^m,4833$ à 0°. 1° On demande la longueur de la règle de platine et de cuivre à 20° ;

2° A quelle division de la règle de platine le bout de la règle de cuivre s'arrêtera-t-il lorsque le système sera porté à cette température de 20° ?

Problème 109. — Un pendule se compose d'une tige de platine d'une longueur l à 0°. Sur un renflement de la partie inférieure de la tige, s'appuie une lentille de zinc. Quel doit être à 0° le diamètre de la lentille pour que son centre reste toujours à la même distance du point de suspension, quelle que soit la température. Coefficient de dilatation du platine, 0,0000088 ; coefficient de dilatation du zinc, 0,0000294.

Problème 110. — Le volume d'une masse de cuivre à 100° est 50^{cc}. Quel sera son volume à 0° ? Le coefficient de dilatation linéaire du cuivre étant 0,0000173.

Problème 111. — Une barre de fer de 4^{mmq} de section, s'allonge de $\frac{1}{81200}$ de sa longueur quand elle est tirée par un poids de 1 kilogr. Quel poids faudrait-il employer pour empêcher qu'une barre de 9^{cmq} de section ne change de longueur, lorsque la température varie depuis 20° jusqu'à 0° ? Le coefficient de dilatation du fer étant 0,000012204.

Problème 112. — Deux règles, l'une de platine et l'autre de cuivre, sont à la température de 0° ; la règle de platine a une longueur de 2 mètres et la règle de cuivre $1^m,9573$; à une température x la différence des longueurs est $0^m,0496$. On demande quelle est cette température. On sait que le coefficient de dilatation du cuivre est 0,0000172, et celui du platine 0,0000088.

Problème 113. — Le poids spécifique du cuivre à 0°, est 8,878 ; le coefficient de la dilatation cubique de ce métal est $\frac{1}{19400}$; le poids spécifique de l'eau à 15° est 0,991 ; ceci posé, on demande quelle perte de poids éprouvera, par son immersion dans l'eau à 15°, un morceau de cuivre du poids de 496 grammes. (*Paris*, 1858.)

Problème 114. — Un vase est plein de mercure à la température de 15° ; on

introduit dans ce vase un morceau de fer dont le poids est de 40 grammes. On demande quel est le poids du mercure qui sortira du vase.

Poids spécifique du fer = 7,788. Coefficient de la dilatation linéaire du fer = 0,0000122.

PROBLÈME 115. — Le poids spécifique du mercure est 13,59 à 0°; on demande quel est à 100° le volume de 40 kilogrammes de ce corps, le coefficient de dilatation du mercure étant $\frac{1}{5550}$. (*Paris*, 1856.)

PROBLÈME 116. — Deux vases communiquants renferment deux liquides : d'abord, de l'eau qui s'élève dans une branche à la hauteur de 1m,55; dans l'autre branche se trouve un liquide dont la hauteur est de 3m,17. Ces deux colonnes liquides se font équilibre et sont à la température de 10°. On demande de trouver la densité du deuxième liquide; on demande, en outre, à quelle hauteur s'élèverait ce liquide, si on portait sa température à 25°, en laissant celle de l'eau à 10°. On suppose qu'il ait un coefficient de dilatation égal à $\frac{1}{6000}$.

(*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 117. — Un tube cylindrique en verre, ouvert par un bout et fermé par l'autre, est en partie rempli par du mercure à 0°, dans une étendue de 95 centimètres. La longueur du tube est de 1 mètre, et son diamètre intérieur de 2 centimètres. A quelle température faudra-t-il porter à la fois le tube et le mercure, pour que ce liquide remplisse toute la capacité intérieure?

On prendra pour le coefficient de dilatation cubique du verre, 0,000026, et pour celui du mercure, 0,00018. (*Toulouse*, 1856.)

PROBLÈME 118. — Un tube de verre plein de mercure à 0°, étant chauffé à 100°, a laissé échapper 27gr,2 de ce liquide; la dilatation apparente du mercure dans le verre est de $\frac{1}{6480}$ pour chaque degré. On demande le poids du mercure à 0° et le volume du tube. (*Limoges*, 1856.)

PROBLÈME 119. — On a deux thermomètres à mercure construits avec le même verre; l'un a une boule dont le diamètre intérieur est 7mm,5, et un tube dont le diamètre intérieur est 2mm,5, l'autre a une boule de 6mm,2 et un tube de 1mm,5 de diamètre intérieur; on demande quel est le rapport de longueur d'un degré dans les deux thermomètres. (*Paris*, 1855.)

PROBLÈME 120. — Un vase ayant la forme d'un cône dont le sommet est à la partie inférieure et dont l'axe est vertical, contient du mercure dont la hauteur est de 15 millimètres à 5°. On demande à quelle température doit être porté le système pour que la hauteur du liquide dans le vase augmente de 0mm,15. On donne le coefficient de dilatation absolue du mercure $\frac{1}{5550}$.

PROBLÈME 121. — Un réservoir de 250cc de capacité à 0°, se trouve soudé à un tube divisé en parties égales de la contenance de 2 millimètres cubes. A 0°,

le réservoir est plein de mercure, ainsi que les cinquante premières divisions de la tige.

On demande quel sera à 20° le nombre total des divisions de la tige remplies par le mercure.

Coefficient de la dilatation cubique du verre, $\frac{1}{38700}$; du mercure, $\frac{1}{5550}$.

(Concours général, 1855.)

Problème 122. — Un vase de verre est complétement rempli par 6 kilogrammes de mercure à 30°; on demande le volume de ce vase à 0°. Le poids spécifique du mercure à 0° est de 13,59; son coefficient de dilatation cubique est de $\frac{1}{5550}$; le coefficient de dilatation cubique du verre est de $\frac{1}{38700}$.

(*Paris*, 1858.)

Problème 123. Un tube capillaire en verre est divisé en parties d'égale capacité; chaque division à 0° correspond à un volume de 0^{mmc},012. On veut souffler à l'extrémité de ce tube un réservoir cylindrique de 3 centimètres de hauteur pour en faire un thermomètre à mercure, et l'on demande quel doit être le diamètre intérieur de ce réservoir pour que le degré centigrade corresponde à 10 divisions du tube. On donne le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre $\frac{1}{6480}$.

Problème 124. — Un thermomètre à réservoir sphérique et à tige intérieurement cylindrique, pèse vide 15 grammes; il pèse 45 grammes, quand à la température de 0°, il est plein de mercure jusqu'à l'origine de la tige. Il pèse 46 grammes, quand, toujours à la température de 0°, le réservoir est plein de mercure, ainsi que la tige, dans une longueur de 1 décimètre. La tige est divisée en millimètres. Ceci posé, on demande quelles sont, à 0°, 1° la capacité du réservoir; 2° la capacité de chaque division de la tige; le poids spécifique du mercure à 0° étant 13,59. On calculera le rayon du réservoir et celui de la tige.

(*Paris*, 1858.)

Problème 125. — Un ballon de verre contient, à 0°, 3 kilogrammes de mercure et se trouve complétement rempli par ce métal; on le chauffe à 100°; on demande quel poids de mercure en sort. Le coefficient de la dilatation cubique du verre est de $\frac{1}{38700}$; le coefficient de la dilatation cubique du mercure est de $\frac{1}{5550}$; le poids spécifique du mercure à 0° est de 13,60.

Problème 126. — Dans un tube cylindrique divisé en parties d'égal volume, une colonne de mercure occupe 247 divisions à 0°. On demande le nombre de divisions occupées à 140°. Coefficient de dilatation du mercure, 0,00018; coefficient de dilatation linéaire du verre, 0,000007.

Problème 127. — Une certaine quantité de gaz occupe 1 litre à 10°, quel est son volume à 11°? La pression est constante et le coefficient de dilatation du gaz est 0,00367.

PROBLÈME 128. — Le coefficient de la dilatation cubique de l'air étant $\frac{367}{100000}$ on demande à quelle température il faut chauffer 1 litre de ce gaz pris à 20° pour que son volume devienne $1^{lit},35$. La pression ne change pas pendant l'expérience.

PROBLÈME 129. — Un ballon de verre primitivement plein d'air sec à 0° et sous la pression de $0^m,76$, est chauffé à 100°, il s'échappe 1 gramme de gaz et la pression ne change pas. On demande quel était le volume du ballon à 0° et quel poids de gaz il renfermait. Le poids du litre d'air sec à 0° et sous la pression de $0^m,76$ égale $1^{gr},293$; le coefficient de dilatation cubique du verre est $\frac{1}{38700}$; le coefficient de dilatation cubique de l'air est 0,00367.

(*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 130. — Un ballon de 5 litres à la température de 0° a été rempli d'acide carbonique à la température de 0°, et à la pression de $0^m,76$; on le chauffe à 100° après l'avoir ouvert pour permettre la sortie du gaz. A ce moment la pression extérieure est $0^m,75$. On demande quel poids d'acide carbonique sortira du ballon. Le coefficient de la dilatation du gaz est 0,00367, celui de la dilatation cubique du verre $\frac{1}{38700}$; le poids d'un litre d'air à 0° et sous la pression de $0^m,76$ est $1^g,293$; la densité de l'acide carbonique rapportée à celle de l'air est 1,526. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 131. — On a enfermé un baromètre dans un large tube plein d'air qu'on a ensuite fermé à la lampe. La température de ce tube et du baromètre, au moment de la fermeture du tube, était de 13°; la hauteur du baromètre était en ce moment de $0^m,76$. On demande à 0,0001 près, à quelle hauteur le mercure s'élèvera dans le baromètre quand la température de cet air et du baromètre sera portée à 30°. On prendra pour coefficient de dilatation absolue du mercure $\frac{1}{5550}$, et pour celui de l'air, 0,00366. On négligera la dilatation du verre.

(*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 132. — Le poids d'un corps dans l'air est de 32 grammes; son poids quand il est immergé dans l'eau à 4° est de 26 grammes; il ne pèse que 24 grammes quand il est immergé dans un autre liquide à 0°; il pèse enfin $24^{gr},3$ dans ce liquide à 20°; on demande : 1° le volume de ce corps; 2° son poids spécifique; 3° le poids spécifique du liquide; 4° le coefficient de dilatation de ce liquide. On suppose que le corps n'a jamais changé de volume pendant l'opération. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 133. — Cinq litres d'un gaz, analogue par ses propriétés physiques à l'air atmosphérique, pèsent $7^{gr},529$ à la température de 15°,2, et à la pression de 0,745; on demande : 1° combien 5 litres de ce gaz pèseraient à la température de 0° et à la pression de 0,76; 2° à la température de 25°,4 et à la pression de 0,65. Le coefficient de dilatation de ce gaz est $\frac{1}{273}$.

(*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 134. — On a deux baromètres A et B qui tous les deux sont à $0^m,76$, le thermomètre centigrade marquant 15°. Dans le baromètre A on introduit une quantité d'air qui fait baisser le mercure de $0^m,70$. Cet air occupe $0^m,14$ le tube du baromètre ayant $0^m,84$ de hauteur. La pression barométrique et la température viennent à varier ; le baromètre B marque $0^m,745$ et le thermomètre 25°. Quel est alors l'espace qu'occupera l'air du baromètre A ?

(CONCOURS GÉNÉRAL, 1811.)

PROBLÈME 135. — Une sphère solide dont le rayon est $0^m,6$ pèse $5^{kil},640$ dans l'air sec à 30° sous la pression de $0^m,780$; quel serait le poids de cette sphère dans le vide ?

Le poids du litre d'air sec. à 0°, sous la pression de $0^m,760$, est de $1^{gr},3$.

On ne tiendra pas compte de la variation de volume de la sphère par le changement de température. (*Nancy*, 1855.)

PROBLÈME 136. — Un ballon de verre dont le volume extérieur est de 10 litres à zéro est en équilibre dans l'air sec à zéro et à la pression de 775 millimètres. On suppose que la température s'élève à 30°, que l'air se sature d'humidité à cette température, que la pression totale devienne 745 millimètres, et l'on demande d'exprimer en grammes la variation que ces changements de conditions atmosphériques auront apportée à la perte de poids que le ballon éprouve par le fait de son immersion dans l'air. Le coefficient de dilatation cubique du verre est $\frac{1}{38700}$, la tension de la vapeur à 30° est $31^{mm},5$, la densité de la vapeur rapportée à celle de l'air $\frac{5}{8}$; enfin à zéro et sous la pression de 760 millimètres 1 litre d'air pèse $1^{gr},293$. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1856.)

PROBLÈME 137. — Un thermomètre différentiel est formé par deux boules sphériques de même rayon dont on néglige la dilatation, elles sont réunies par un tube de communication deux fois recourbé à angle droit comme dans le thermomètre de Leslie. La première boule est remplie de gaz à la pression de $0^m,15$, la seconde est à moitié remplie du même gaz et l'autre moitié de la capacité de la boule, ainsi que le tube de communication sont occupés par le mercure ; ceci a lieu quand la température est la même de part et d'autre. On établit ensuite entre les deux boules une différence de température telle que le mercure que contenait l'une d'elles, soit passé entièrement dans l'autre. On demande quelle sera la valeur de cette différence sachant que le rayon de chaque sphère est de 8 millimètres.

PROBLÈME 138. — Un vase en verre que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté, à l'aide d'un robinet, est rempli d'air sec à 0° sous la pression de $0^m,750$. Il est plongé dans une atmosphère d'acide carbonique possédant la même pression. On porte le vase à 100°, on ouvre le robinet pour que l'air puisse s'échapper en partie, on ferme, on fait redescendre la température du ballon à 0° et on ouvre le robinet, le ballon étant plongé dans l'atmosphère d'acide carbonique. Une certaine portion de ce dernier gaz pénétrera dans le ballon. On reproduit une seconde fois les mêmes opérations et on demande de calculer la quantité d'acide

carbonique qui a pénétré en totalité dans le ballon. On donne le coefficient de dilatation du verre 0,0000258 et celui du gaz 0,00371.

PROBLÈME 139. — Les expériences faites pour déterminer le poids spécifique du mercure ont été exécutées par M. Regnault au moyen de la méthode du flacon. Le flacon était rempli à 0° successivement d'eau et de mercure; mais les pesées s'exécutaient à la température ordinaire : ce qui est indispensable pour éviter les courants d'air et les précipitations de vapeur d'eau. Les résultats ont été les suivants :

Poids apparent du mercure dans l'air 3156,613. Les pesées étant faites à 17°,5 et sous la pression 754mm,00.

Poids apparent de l'eau dans l'air, 231gr,888, les pesées étant faites à 18°,6 et sous la pression 755mm,01. On sait d'ailleurs que le poids spécifique de l'eau à 0° est 0,999881.

Quel est le poids spécifique du mercure?

SECTION VIII

DENSITÉS DES GAZ

Les problèmes concernant les densités des gaz se résolvent comme ceux de la septième section en appliquant les mêmes formules. Il ne faut pas oublier que le mot densité a ici une signification particulière : c'est le rapport des poids de volumes égaux du gaz considéré et de l'air dans les mêmes conditions de température et de pression.

PROBLÈME 140. — Dix litres d'un certain gaz à 27°, sous la pression 0m,684 pèsent 16gr,15, quelle est la densité de ce gaz, et d'après la densité quel peut être le gaz? 1 litre d'air à 0° et sous la pression 0m,76 pèse 1gr,293. Le coefficient de dilatation du gaz est $\frac{1}{273}$. (*Poitiers*, 1860.)

Solution.—Il faut chercher ce que pèseraient 10 litres du gaz en question à 0° et sous la pression 0,76, le quotient de ce poids par 12,93, poids de 10 litres d'air dans les mêmes conditions, sera la densité cherchée. Soit x le poids de 10 litres du gaz à 0° et à la pression 0m,76. On aura en appliquant la formule (c) (267).

$$x = 16,15\,\frac{760}{684}\left(1 + \frac{27}{273}\right) = 19^{gr},72.$$

la densité cherchée sera donc égale à

$$\frac{19,72}{12,93} = 1,526.$$

Le gaz en question est l'acide carbonique ou le protoxyde d'azote.

PROBLÈME 141. — Quel est le poids de 12 litres d'air à 30° sous la pression de 0m,80 de mercure, sachant que 1 litre d'air à 0° sous la pression de 0m,76 pèse 1gr,3 ? (*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 142. — A quelle température 1 litre d'air sec pèse-t-il 1 gramme sous la pression de 0m,77, le coefficient de dilatation du gaz étant 0,00366 et le poids d'un litre d'air sec à 0° et à la pression de 0,76 étant 1gr,293 ? (*Paris*, 1854.)

PROBLÈME 143. — On a pesé successivement dans le même ballon deux gaz; le premier gaz pesait 1gr,543, le second 1gr,789, la température de la première pesée était 18°,5, celle de la seconde était 17°,8. On demande le rapport entre la densité du premier gaz et celle du second; on prendra 0,00366 pour le coefficient de la dilatation des deux gaz. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 144. — Un ballon renferme de l'air sec à 10°, et sous la pression de 756mm; le poids de cet air est 6gr,32; on demande quel serait le poids d'acide carbonique qui remplirait le même ballon à la température de 0° et sous la pression 760mm. On donne la densité de l'acide carbonique 1,526; le coefficient de dilatation cubique du verre $\frac{1}{38700}$, celui du gaz $\frac{1}{275}$. (*Paris*, 1856.)

PROBLÈME 145. — Calculer les poids de l'oxygène et de l'azote contenus dans l'air d'une pièce qui a la forme d'un parallélipipède rectangle, dont les trois dimensions sont 3 mètres, 3m,50, 4 mètres.

L'air est supposé à 0°, la pression atmosphérique étant 0m,76. On négligera l'acide carbonique de l'air et l'on prendra pour densité de l'oxygène 1,1026, pour celle de l'azote 0,9757. (*Rodez*, 1856.)

PROBLÈME 146. — Les opérations faites par M. Regnault pour obtenir le poids spécifique de l'acide carbonique ont donné les résultats suivants, que nous copions textuellement :

Pour l'air.

Ballon plein d'air dans la glace. Hauteur du baromètre réduite à 0 degré, au moment de la fermeture du robinet............	H_0 = 717mm,21
Poids ajouté au ballon....................................	p = 1gr,699
Ballon vide dans la glace. Force élastique de l'air resté dans le ballon au moment de la fermeture du robinet	h_0 = 7mm,56
Poids ajouté au ballon....................................	P = 14gr,1345

Pour l'acide carbonique.

Ballon plein	H_0' = 756mm,34 p' = 0gr,808
Ballon vide...	h_0' = 1mm,71 P_0' = 20gr,2085

On demande quelle est la densité de l'acide carbonique.

Problème 147. — A la suite de l'expérience précédente, M. Regnault a chauffé à 99°,85 le ballon plein d'acide carbonique sous la pression de 755^mm^,68; il en est sorti un poids de gaz égal à 5^gr^,247. On demande de combiner ces résultats avec ceux de l'expérience qui précède pour trouver la valeur du coefficient de dilatation de l'acide carbonique.

Problème 148. — Dans une autre série d'expériences M. Regnault, en opérant à la température de l'eau bouillante, a trouvé :

Ballon rempli de gaz acide carbonique dans l'eau bouillante à la température 100°,01 et sous la pression H_0....	H_0 = 760mm,34 P' = 5gr,901
Ballon dans l'eau bouillant à 99°,92, le gaz ayant une force élastique F_0	F_0 = 343mm,08 P = 13gr,7405
Ballon vide dans l'eau bouillante encore à 99°,97, le gaz ayant la force élastique h	h = 4mm,69 P = 20gr,091

On demande de vérifier si, à la température de l'eau bouillante, l'acide carbonique suit la loi de Mariotte.

Problème 149. — Un ballon qui contient 3560 grammes d'eau à la température de 20°, est vidé, séché et rempli, sous la pression de 0m,750 et à la température de 20°, d'un gaz sec. Le poids du gaz que le ballon contient dans ces circonstances est 6gr,2. On demande quelle est la densité de ce gaz. Densité de l'eau à 20°, 0,99821. Coefficient de dilatation cubique du verre, 0,000026.

(*Paris*, 1858.)

Problème 150. — Un flacon plein d'air sec sous la pression de 76 centimètres et à la température de 0° pèse 740 grammes; plein d'un autre gaz, 742gr,4, et plein d'eau distillée 2 020 grammes, toujours à la même température et sous la même pression. On suppose que la densité de l'air dans ces mêmes circonstances, est égale à $\frac{1}{773}$ de celle de l'eau. On demande le rapport de la densité du gaz à celle de l'air.

(*Poitiers*, 1855.)

Problème 151. — Déterminer le poids du litre d'air sec à 0°, sous la pression de 0m,76.

Ballon plein d'air dans la pression de 761mm,19............	P = 1gr,487
Ballon vide dans la glace. Force élastique de l'air restant : 8mm,43. Poids ajouté au ballon.........	P = 14gr,151
Poids du ballon ouvert à 4°,2, et à 757mm,89..............	1 258gr,55
Poids du ballon plein d'eau à 0°, pesé à 6° et 761mm,77.. ...	11 268gr,06
La densité de l'eau 0° étant 1, elle est à 4° de..	$\frac{1}{0,99981}$

(Concours général, 1854.)

Nota. Les nombres donnés dans cette question sont ceux que M. Regnault a obtenus lorsqu'il a déterminé le poids du litre d'air.

SECTION IX

VAPEURS. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS. — LIQUÉFACTION DES GAZ

Dans les calculs que l'on fait sur les vapeurs, on admet (ce qui n'est qu'approximatif) que la loi de Mariotte et celle de Gay-Lussac sont applicables à ces fluides élastiques jusqu'au point de saturation. Dès l'instant qu'une vapeur n'est pas saturée, on peut lui appliquer les formules qui ont été données à propos de la dilatation des gaz.

Quand il s'agit des mélanges de gaz et de vapeur et qu'il faut estimer des variations de volume tenant à des changements de pression ou de température, on ne tient compte que du gaz, en supposant qu'il occupe tout le volume du mélange et en lui attribuant la pression qui lui est propre. S'il est question d'évaluer les poids de mélanges de ce genre, on estime séparément le poids du gaz et celui de la vapeur qui sont considérés comme occupant l'un et l'autre le volume total du mélange; on attribue à chacun la force élastique qui lui appartient ; force élastique qui est constante, quand la température ne change pas, s'il s'agit d'une vapeur saturée ; force élastique qui dépend du volume, si la vapeur n'est pas à saturation.

La solution des deux problèmes généraux (§§ 391, 392) indique la marche à suivre dans la majorité des cas.

Problème 152. — Sachant qu'un litre d'air à 0°, sous la pression de 0,76, pèse 1,293, sachant que la densité de la vapeur d'eau est les $\frac{5}{8}$ de celle de l'air ; on demande le poids d'un mètre cube d'air humide à 20°, sous la pression de 0m,77. L'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$ et la tension maximum de la vapeur d'eau à 20° est 17mm,39. *(Paris, 1855.)*

Solution. — Un mètre cube d'air sec à 0° et sous la pression 760mm pèse 1kil,293.

Un mètre cube cube d'air sec à 20° et sous la pression $770 - \frac{3}{4}$ (17mm,39). pèse x. On a d'après la formule (*e*) (§ 267)

$$x = 1,293\left(\frac{770 - 13,04}{760}\right)\frac{1}{1 + 20 \times 0,00366}.$$

Un mètre cube de vapeur à 20° et sous la pression 13mm,04 pèsera y.

$$y = 1,293\left(\frac{13,04}{760}\right)\left(\frac{1}{1 + 20 \times 0,00366}\right) \times \frac{5}{8}.$$

Le mètre cube d'air humide pèsera donc :

$$x + y = \frac{1,293}{760\,(1 + 20 \times 0,00366)}\left\{770 - \frac{3}{8} \times 13,04\right\} = 1,213.$$

Ainsi, le mètre cube d'air humide pèse 1kil,213.

PROBLÈME 153. — Un mélange d'acide carbonique et de vapeur d'eau qui pèse $5^{gr},25$ remplit un ballon de verre à la température de 24° sous la pression totale de $0^{m},758$; la tension de la vapeur d'eau est de 22^{mm}. On demande quel serait le poids d'acide carbonique sec qui remplirait le même ballon à la même pression et à la même température? La densité de l'acide carbonique rapportée à celle de l'air est 1,52 ; celle de la vapeur d'eau, 0,622.

Solution. — Si on appelle V le volume inconnu du ballon, le poids x d'acide carbonique sec qui le remplirait à 24° et sous la pression $0^{m},758$ s'obtiendra en appliquant la formule (*e*) donnée au § 267.

$$x = V \times 1{,}29 \times 1{,}52\ \frac{758}{760}\left(\frac{1}{1 + 0{,}00366 \times 24}\right).$$

La valeur de V peut se déduire aisément des données de l'expérience ; car le poids du mélange qui est de $5^{gr},25$ se compose du poids de l'acide carbonique qui occupe le volume V du ballon et possède la force élastique $(758 - 22^{mm})$ ou 736^{mm} et du poids de la vapeur qui occupe le même volume avec la pression de 22^{mm} ; on aura donc

$$5{,}25 = V \times 1{,}29 \times 1{,}52\ \frac{736}{760}\left(\frac{1}{1 + 0{,}00366 \times 24}\right) + V \times 1{,}29 \times$$

$$\ldots\ldots \times 0{,}622\ \frac{22}{760}\left(\frac{1}{1 + 0{,}00366 \times 24}\right);$$

ou bien

$$5{,}25 = \frac{V \times 1{,}29}{760\,(1 + 0{,}00366 \times 24)}\,(1{,}52 \times 736 + 22 \times 0{,}622);$$

divisant la première équation qui donne la valeur de x par cette dernière, V se trouve éliminé, on a :

$$\frac{x}{5{,}25} = 1{,}52 \times 758\left(\frac{1}{1{,}52 \times 736 + 22 \times 0{,}622}\right);$$

d'où

$$x = \frac{5{,}25 \times 1{,}52 \times 758}{1{,}52 \times 736 + 22 \times 0{,}622} = 5{,}3;$$

Ainsi le poids d'acide carbonique sec qui remplirait le ballon dans les mêmes conditions serait $5^{gr},3$; on pourrait obtenir aussi le volume du ballon en litres, en substituant à la place de x sa valeur dans la première égalité.

PROBLÈME 154. — Nous introduisons dans un corps de pompe au-dessous du piston dont ce corps de pompe est muni : 6 litres d'azote, 10 litres d'hydrogène, 4 litres de gaz ammoniac, les trois gaz étant pris à la pression d'une atmosphère. On fait alors descendre le piston jusqu'à ce que le gaz ammoniac commence à se liquéfier ; à ce moment, un manomètre qui communique avec le corps de pompe marque $32^{atm},75$. On demande de déduire de là la valeur de la pression nécessaire pour liquéfier le gaz ammoniac.

Solution. — Nous partons de ce principe que la loi du mélange des gaz nous

conduit à admettre, à savoir : que dans un mélange de plusieurs gaz, chaque gaz se conduit comme s'il était seul. Ainsi, la force expansive que pourront acquérir l'azote et l'hydrogène n'influera en rien sur le gaz ammoniac pour le liquéfier.

Les trois gaz occupaient un volume initial $6+10+4$ ou 20, avec une pression initiale de 1^{atm}, quel est leur volume y, quand la pression devient $32^{atm},75$? Appliquant la loi de Mariotte, on a :

$$y \times 32,75 = 20, \quad \text{ou} \quad y = \frac{20}{32,75}.$$

Tel est aussi le volume occupé par le gaz ammoniac, au moment de sa liquéfaction, nous dirons donc : le gaz ammoniac avait

Un volume initial.... 4 sous la pression de 1^{atm},

Un volume final..... $\frac{20}{32,75}$ sous la pression x,

on en déduira

$$x = \frac{4 \times 32,75}{20} = 6^{atm},5.$$

Ainsi le gaz ammoniac s'est liquéfié sous la pression de 6,5 atmosphères.

Problème 155. — On détermine le poids de vapeur d'eau contenu dans un volume connu d'air humide en employant la méthode chimique. On déduit des données fournies par cette expérience (§ 444) que dans l'air ambiant qui possédait la température de 20°, l'état hygrométrique était de 0,50. A une autre époque, on a refait la même expérience, et retrouvé le même poids de vapeur dans un égal volume d'air; mais, cette fois, la température de l'air ambiant n'est plus que 15°. Comment peut-on déduire de ces résultats le nouvel état hygrométrique de l'air? On sait (§ 383) que la force élastique maxima de la vapeur d'eau à 20°, est $17^{mm},39$ et à 15°, $12^{mm},70$.

Solution. — Puisque, à 20° et à 15°, la même masse de vapeur occupe le même volume, sa tension doit varier proportionnellement aux binomes de dilatation. Car, lorsque, dans la formule (*d*) (§ 266), on fait $V_{t'} = V_t$, on a $\frac{H'}{H} = \frac{1 \times \alpha t'}{1 \times \alpha t}$. Or, dans la première expérience, à 20°, la force élastique de la vapeur est connue : elle est le produit de la force élastique maxima à cette température par l'état hygrométrique ou $17,39 \times 0,50$. Dans la seconde expérience, à la température de 15°, la force élastique de la vapeur doit être $12,70 \times x$ en appelant x l'état hygrométrique; on aura donc l'égalité

$$12,70 \times x = 17,39 \times 0,5 \left(\frac{1 + 0,00366 \times 15}{1 + 0,00366 \times 20}\right),$$

d'où

$$x = \frac{17,39 \times 0,5\,(1 + 0,00366 \times 15)}{12,7\,(1 + 0,00366 \times 20)} = 0,7.$$

L'état hygrométrique nouveau était donc 0,7.

Problème 156. — Un appareil ayant la forme d'un thermomètre à mercure se compose d'un réservoir cylindrique de verre, à parois épaisses, muni d'un tube cylindrique et très-résistant formé par la même substance. Le réservoir à la température de 0° est plein de mercure ; le tube est rempli par un gaz que l'on veut liquéfier et qui s'y trouve d'abord, avec la pression d'une atmosphère, à la température de 0°. On ferme le tube à la lampe et on le maintient invariablement dans la glace fondante, pendant qu'on chauffe progressivement le réservoir. On demande à quelle température il faudra porter ce réservoir pour que le gaz demeuré à 0° acquière la pression de 200 atmosphères (*). Le tube et le réservoir ont même longueur, leurs diamètres sont dans le rapport de 1 à 30. On sait que le coefficient de dilatation absolue du mercure est $\frac{1}{5550}$ et le coefficient de dilatation apparente dans le verre employé $\frac{1}{6480}$. On admet que, même dans le cas de la pression de 200 atmosphères, le gaz suive la loi de Mariotte.

Solution. — Soient l la longueur du tube et par suite celle du réservoir ; r le rayon du tube, $30r$ sera celui du réservoir ; enfin, appelons λ la longueur occupée dans le tube par le mercure qui sort du réservoir quand on le chauffe et x la température à laquelle ce dernier se trouve porté.

$\pi r^2 l$ est le volume primitif du gaz et la pression correspondante est 1^{atm} ; $\pi r^2(l-\lambda)$ est son volume final, et 200^{atm} la pression correspondante. On a donc la relation

$$\pi r^2 l = \pi r^2 (l-\lambda)\, 200 ; \quad \text{d'où} \quad \lambda = \frac{199}{200}\, l.$$

D'autre part, le mercure occupe à 0° le volume $\pi(30r)^2 l$; pour une élévation de température de x degrés, il sort de ce réservoir un volume

$$\pi\,\overline{(30r)}^2\, l \times \frac{x}{6480} ;$$

ce mercure qui passe dans la tige se trouvant ramené à 0°, y occupe un volume

$$\frac{\pi\,\overline{(30r)}^2\, l \times \frac{x}{6480}}{1+\frac{x}{5550}},$$

mais ce même volume a encore pour expression $\pi r^2 \lambda$, ou bien :

$$\pi r^2 \times \frac{199}{200} \times l.$$

On a donc l'égalité :

$$\frac{\pi\,\overline{(30r)}^2\, l \times \frac{x}{6480}}{1+\frac{x}{5550}} = \pi r^2 \times \frac{199}{200}\, l, \quad \text{ou} \quad \frac{900 \times x \times 5550}{6480\,(x+5550)} = \frac{199}{200} ;$$

(*) L'énoncé de ce problème donne une application numérique de la méthode employée par M. Berthelot pour liquéfier les gaz (§ 426).

d'où :

$$x = \frac{199 \times 6480 \times 5550}{180000 \times 5550 - 199 \times 6480} = 7,2.$$

Ainsi, il suffira, pour déterminer cette pression si considérable, d'une élévation de température de 7°,2. Il est vrai que nous n'avons pas tenu compte de l'augmentation de la capacité de l'enveloppe qui est cependant notable sous l'effort d'une pression intérieure aussi puissante.

Problème 157. — La densité de la vapeur d'eau à 100° sous la pression de 0,760 étant les $\frac{5}{8}$ de celle de l'air à la même température et à la même pression, on demande le poids de cette vapeur renfermée dans un cylindre de $1^m,5$ de hauteur et de $0^m,80$ de diamètre.

Poids d'un litre d'air, à 0° sous 760^{mm} de pression, 1,293 ; coefficient de dilatation de l'air = 0,00366. (*Poitiers*, 1855.)

Problème 158. — On a 2 litres d'air saturé d'humidité à la température de 10° centigrades et sous la pression de 0,758 : on demande ce que deviendra ce volume à la température de 65° centigrades et sous la pression de 0,762. La force élastique de la vapeur d'eau, aux températures de 10° et de 65°, est de $9^{mm},2$ et de 187^{mm}. (*Nancy*, 1857.)

Problème 159. — A la température de 30° centigrades, et à la pression de 780 millimètres, de l'air saturé d'humidité occupe un volume de 10 mètres cubes. On demande ce que deviendra le volume d'air saturé à 0° et à 760 millimètres de pression. On sait qu'à 30° la force élastique maxima de la vapeur d'eau est de $31^{mm},548$, et à 0° cette force est de $4^{mm},600$. Coefficient de dilatation : $\frac{1}{273}$ (on ne tiendra pas compte de la vapeur d'eau condensée).

(*Marseille*, 1860.)

Problème 160. — Étant donnés 7 225 centimètres cubes de gaz saturé d'humidité à 22°, on demande le poids de l'eau qui s'y trouve contenue, la tension de la vapeur d'eau est supposée égale à $19^{mm},659$ à 22°.

(Concours général, 1853.)

Problème 161. — Étudier le phénomène physique résultant du mélange intime dans l'atmosphère de deux masses d'air saturées de vapeur d'eau, mélange qui est effectué par l'action de deux vents contraires. L'une des masses a un volume de 3 mètres cubes, une température de 10° ; l'autre, un volume de 5 mètres cubes, une température de 18°. Y aura-t-il précipitation d'eau et dans ce cas quel sera le poids de l'eau précipitée ? On donne la force élastique maxima de la vapeur d'eau à 10° = $9^{mm},16$.
à 15° = $12^{mm},699$.
à 18° = $15^{mm},357$.

Problème 162. — On introduit dans un vase dont la capacité est 10 litres,

3 litres d'hydrogène dont l'état hygrométrique est $\frac{1}{3}$, 2 litres d'air dont l'état hygrométrique est $\frac{1}{2}$ et 7 litres d'azote sec. On demande : 1° l'état hygrométrique du mélange. L'expérience a été faite à 20°; à cette température, la tension maxima de la vapeur est $17^{mm},39$. On demande 2°, le poids de la vapeur contenue dans le mélange ; on sait que la vapeur d'eau pèse les 0,622 d'un même volume d'air sec à la même pression et à la même température.

Problème 163. — Un vase de 27 litres est rempli d'air saturé d'humidité à la température de 12° et soumis à la pression de $0^{m},75$; la force élastique de la vapeur d'eau exprimée en atmosphères étant $0^{atm},014$. On demande le poids d'un mètre cube de ce mélange. (*Nancy*, 1859.)

Problème 164. — Un ballon de 10 litres de capacité est plein d'air saturé d'humidité à 30°, sous $0^{m},76$ de pression. On demande le poids de l'air sec et le poids de la vapeur d'eau qu'il renferme.

Force élastique de la vapeur d'eau à 30°, $31^{mm},548$; poids du litre d'air à 0°, sous $0^{m},760$, $1^{gr},293$; coefficient de la dilatation des gaz, $\frac{1}{273}$; densité de la vapeur, $\frac{5}{8}$ de celle de l'air. (*Poitiers*, 1860.)

Problème 165. — Un tube barométrique cylindrique est renversé dans une cuvette de mercure. La partie supérieure contient de l'air sec dans une longueur de 30 centimètres. La longueur de la colonne mercurielle est de 61 centimètres au-dessus du niveau dans la cuvette. On introduit de l'éther sans laisser entrer de l'air. Le mercure baisse, l'équilibre s'établit, le mélange d'air et de vapeur occupe alors un espace de 60 centimètres, et la colonne de mercure n'est plus que 31 centimètres.

Quelle est la force élastique de la vapeur d'éther ? La pression extérieure vaut $0^{m},76$. (*Paris*, 1859.)

Problème 166. — 12 litres d'air à 10°, sous la pression extérieure de 760 millimètres, sont en contact avec de l'eau. On chauffe le tout à 50°, sous la même pression. Quel sera le volume occupé par le mélange d'air et de vapeur ? Tension maxima de la vapeur à 10°, $9^{mm},16$; à 50°, 92^{mm}.

(*Poitiers*, 1860.)

Problème 167. — La force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est 760 millimètres, celle de la vapeur seule est 6 millimètres. La température restant constamment égale à 10°, on demande la force élastique du mélange quand son volume sera réduit au tiers. La tension maxima de la vapeur à 10° est de $9^{mm},16$.

Problème 168. — Une certaine quantité d'air sec pèse $1^{gr},2$ à la température de 0°, et sous la pression de $0^{m},76$. On la chauffe à 30° sous la pression de 0,77, en lui permettant de se saturer de vapeur d'eau, et on demande quel sera le volume qu'elle occupera alors. La tension maxima de la vapeur à 30° est de

$0^m,0315$. On prendra $1^{gr},3$ pour poids du litre d'air sec à la température de 0° et sous la pression de $0^m,76$. (*Paris*, 1854.)

Problème 169. — Un ballon de verre dont le volume extérieur est de 10 litres à 0° est en équilibre dans l'air sec à cette température et à la pression de $0^m,75$.

Ceci posé, on suppose que la température s'élève à 30°, que l'air se sature d'humidité à cette température, que la pression totale devienne $0^m,715$. On demande d'exprimer en grammes les variations que ces changements de conditions atmosphériques auront apportées à la perte de poids que le ballon éprouve, par le fait de son immersion dans l'air. Coefficient cubique de dilatation du verre, $\frac{1}{38700}$; tension maxima de la vapeur à 30°, $31^{mm},5$; densité de la vapeur par rapport à l'air, $\frac{5}{8}$. (*Paris*, 1856.)

Problème 170. — Dans l'appareil de M. Despretz (§ 168), pour comparer la compressibilité des gaz, on introduit dans l'une des éprouvettes de l'air sec et dans l'autre un mélange d'acide sulfureux et d'air. Ce dernier gaz représente la fraction $\frac{1}{n}$ du volume total quand on le ramène à la même pression que le mélange. Les volumes des gaz, dans les deux éprouvettes, sont égaux à l'origine et ils supportent la pression H de l'atmosphère. On demande si, en exerçant une pression croissante, il arrivera un moment où les deux volumes gazeux qui se montrent inégaux quand on commence à comprimer, redeviendront rigoureusement égaux ; et, dans le cas d'une réponse affirmative, quelle sera alors la valeur de la pression commune. On sait que l'acide sulfureux se liquéfie sous une pression de 5 atmosphères.

Problème 171. — Un litre d'air sec à 0° et sous la pression $0^m,76$ pèse $1^{gr},293$. Le coefficient de dilatation de ce gaz est 0,00366. La densité de la vapeur d'eau rapportée à celle de l'air prise pour unité est de $\frac{5}{8}$; la tension maxima de la vapeur d'eau à 30° est $0^m,0315$. Ceci posé, on demande quel volume occupe cet air à 30° et sous la pression de $0^m,76$, 2° quel est son volume quand, à la même température, il possède un état hygrométrique égal à $\frac{2}{3}$.

(*Paris*, 1858.)

Problème 172. — Dans un vase ayant une capacité de 2 litres et rempli d'air sec à 30° et sous la pression $0^m,76$, on introduit 20 milligrammes d'eau. Après l'introduction on ferme le vase et on demande :

1° Quel est l'état hygrométrique ?

2° Quelle sera la pression du mélange après que la vaporisation de l'eau aura été aussi complète que possible.

Tension maxima de la vapeur d'eau à 30°, $31^{mm},5$; densité de la vapeur d'eau, 0,622 ; poids spécifique de l'air, 0,001293. (Concours général, 1857.)

Problème 173. — Un courant d'air sec et un courant d'hydrogène saturé

d'humidité passent avec des vitesses constantes dans un récipient où ils se mêlent exactement.

Lorsque tout l'air primitivement renfermé dans le récipient a été expulsé par le courant mixte, on recueille une certaine portion du mélange et on l'analyse dans l'eudiomètre à eau, après lui avoir laissé le temps de se saturer; l'analyse indique que, dans le mélange saturé, il y a volumes égaux d'air et d'hydrogène. Ceci posé, on demande quel était l'état hygrométrique du courant gazeux mixte, dans le récipient où on a puisé le mélange à analyser.

On demande en outre, quel était le poids de la vapeur renfermée dans un litre de ce mélange.

La pression sous laquelle on opère est $0^m,760$; la température, 20° ; la tension maxima de la vapeur d'eau à 20°, $0^m,0174$; le coefficient de dilatation des gaz, 0,00367 ; le poids spécifique de la vapeur $\frac{5}{8}$ de celui de l'air, dans les mêmes conditions de pression et de température.

Le litre d'air sec pèse $1^{gr},293$ à 0° et à 760 millimètres de pression.

(Concours général, 1857.)

Problème 174. — La capacité du corps de pompe d'une machine de compression est les 0,015 de la capacité du récipient. On donne quatre-vingt-quinze coups de piston, quel est le rapport entre la densité primitive de l'air et sa densité actuelle ? A quel volume sera réduit le volume d'air de l'éprouvette.

Cette éprouvette plonge dans le mercure, elle est tellement disposée qu'à mesure que marche l'expérience, le tube s'enfonce dans le bain de manière que le niveau est toujours le même et dans le tube et dans le bain. Le volume primitif de l'air de l'éprouvette est de 100 parties ; cette éprouvette est parfaitement cylindrique.

La pression extérieure n'a pas changé pendant l'expérience. Si l'éprouvette était invariablement fixe, pourrait-on calculer la hauteur à laquelle s'élèverait le mercure dans le tube au-dessus du bain ? (Concours général, 1842.)

Problème 175. — On demande quel est le poids d'un litre de vapeur d'un liquide, pour lequel on a trouvé les données numériques suivantes :

Température de l'air extérieur, $9^o,5$; température de la vapeur, 259 degrés ; excès du poids du ballon, $0^{gr},763$; capacité du ballon, 325 centimètres cubes ; pression barométrique, $0^m,760$; air restant, 0.

Problème 176. — Un mètre cube d'air est complétement saturé de vapeur d'eau ; sa température est de 56° et sa force élastique de $0^m,753$. On abaisse la température de cet air jusqu'à 19° et l'on réduit sa force élastique à $0^m,670$.

On demande : 1° Quel sera le volume occupé par l'air humide dans ces nouvelles conditions de température et de pression ;

2° Quel est le poids de la vapeur d'eau qui prendra l'état liquide ;

3° Quelle est la quantité de chaleur que l'air humide primitif aura perdue, en subissant ce changement de température et de pression.

La formule qui lie les forces élastiques de la vapeur d'eau avec la température est (voir § 384) :

$$\text{Log } F = a - b\alpha_1^T - c\beta_1^T,$$

dans laquelle

$$a = +4{,}7384380,$$
$$\text{Log } \alpha_1 = 0{,}0068650$$
$$\text{Log } \beta_1 = 1{,}9967249$$
$$\text{Log } b = 2{,}1340339$$
$$\text{Log } c = 6{,}1106485$$

et $T = t + 20$, t étant la température comptée à partir de celle de la glace fondante.

Problème 177. — Quel serait en kilogrammes le poids dont il faudrait charger une soupape circulaire de $0^m,7$ de diamètre pour l'empêcher de se soulever avant que la pression dans la chaudière ait atteint la force élastique de 8 atmosphères, la pression extérieure étant 1 atmosphère. On sait que 1 atmosphère correspond au poids d'une colonne de mercure de $0^m,76$ de hauteur ; la densité du mercure est 13,6.

SECTION X

CALORIMÉTRIE. — CHALEURS SPÉCIFIQUES. — CHALEURS LATENTES.

La plupart des problèmes se rapportant à cette section se résolvent par l'application de ce principe très-simple : Lorsqu'on fait un mélange de divers liquides inégalement chauds, ou bien lorsqu'on introduit dans un liquide un corps solide qui n'a pas la même température que lui, la quantité de chaleur cédée par le corps le plus chaud pour que sa température descende jusqu'à celle du mélange, est égale à la quantité de chaleur absorbée par le corps le plus froid, pour que sa température atteigne aussi celle du mélange. Dans cette égalité, entrent à la fois les données numériques de la question et les inconnues qui peuvent être : la chaleur spécifique de l'un des corps, sa chaleur latente de fusion ou de volatilisation, sa température initiale ou finale, ou enfin son poids.

On n'oubliera pas que pour obtenir le nombre de calories absorbé ou dégagé par un corps dont la température s'élève ou s'abaisse, il suffit de faire le produit de son poids exprimé en kilogrammes, par sa chaleur spécifique et par la variation de température qu'il a subie (voir à ce sujet §§ 451 et 452).

Problème 178. — 100 grammes de cuivre à 100° plongés dans 500 grammes d'eau à 5°,1 ont élevé la température de cette masse liquide à 6°,8. La même expérience étant répétée avec 800 grammes d'essence de térébenthine à 6°, la température de l'essence s'est élevée à 8°,5.

On demande quelle est la chaleur spécifique de l'essence.

(Concours général, 1859.)

Solution. — Soient x la chaleur spécifique du cuivre et y celle de l'essence de

térébenthine. Dans la première expérience, le cuivre a abandonné

$$0{,}1\,(100 - 6{,}8)\,x \text{ calories (*)}.$$

L'eau en a absorbé

$$0{,}5\,(6{,}8 - 5{,}1),$$

on a donc l'égalité :

$$0{,}1\,(100 - 6{,}8)\,x = 0{,}5\,(6{,}8 - 5{,}1) \quad \text{ou} \quad 9{,}32 \times x = 0{,}85. \qquad (a)$$

Dans la seconde expérience, le cuivre a abandonné

$$0{,}1\,(100 - 8{,}5)\,x \quad \text{ou} \quad 9{,}15 \times x \text{ calories.}$$

L'essence en a absorbé

$$0{,}8\,(8{,}5 - 6)\,y \quad \text{ou} \quad 2y,$$

on a donc

$$9{,}15 \times x = 2y. \qquad (b)$$

Divisant membre à membre (b) par (a) pour éliminer x, on a

$$\frac{2y}{0{,}85} = \frac{9{,}15}{9{,}32} \quad \text{ou} \quad y = \frac{9{,}15 \times 0{,}85}{2 \times 9{,}32} = 0{,}417.$$

La chaleur spécifique de l'essence de térébenthine est donc 0,42.

Problème 179. — Dans une masse d'eau liquide à 0°, entourée d'air à 0, on a introduit 100 grammes de glace dont la température avait été préalablement abaissée à — 12° ; un poids d'eau égal à 7gr,6 s'est congelé autour du glaçon immergé pendant que sa température remontait à 0°. On demande de déduire de là la chaleur spécifique de la glace. La chaleur latente que dégage un kilogramme d'eau en se solidifiant est 79,2.

Solution. — Soit x cette chaleur spécifique. La chaleur absorbée par 0kil,1 de glace pour monter de — 12° à 0° sera

$$0{,}1 \times 12 \times x.$$

La chaleur dégagée par les 0kil,0076 de glace formée sera

$$0{,}0076 \times 79{,}2\,;$$

on aura donc l'égalité :

$$0{,}1 \times 12 \times x = 0{,}0076 \times 79{,}2,$$

$$x = \frac{0{,}0076 \times 79{,}2}{1{,}2} = 0{,}5.$$

Ainsi la chaleur spécifique de la glace est 0,5, la moitié de celle de l'eau.

(*) Nous mettons 0,1 pour représenter les 100 grammes de cuivre, parce que, comme nous l'avons dit au § 447, nous appelons chaleur spécifique d'un corps le nombre de calories nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme de ce corps.

Problème 180. — On a 1 kilogramme de glace à 0° plongeant dans 2 kilogrammes d'eau liquide à 0°; on demande quel est le poids de vapeur d'eau à 100° nécessaire pour fondre la glace et porter le mélange à 30°. La chaleur latente de fusion de la glace est 79,2; celle de vaporisation de l'eau, 537.

Appelons x le poids (en kilogrammes) de vapeur d'eau à 100° nécessaire pour obtenir le résultat voulu. La quantité de chaleur qu'elle abandonne pour se liquéfier et pour descendre ensuite à la température de 30°, quand elle est liquide, est représentée par

$$x \times 537 + x(100 - 30).$$

La quantité de chaleur absorbée par la glace pour fondre est 79,2; celle qui est prise par les 3 kilogrammes d'eau liquide pour s'élever à 30° est 3×30. On aura donc l'égalité :

$$x \times 537 + x(100 - 30) = 79,2 + 3 \times 30;$$

d'où

$$x = \frac{169,2}{607} = 0^{kil},278,$$

il faudra $0^{kil},278$ de vapeur d'eau.

Problème 181. — Un vase métallique renferme $32^{kil},50$ d'eau à 14°,5; la chaleur spécifique du métal est 0,12, et son poids $1^{kil},7$; on met dans l'eau que contient ce vase $8^{kil},25$ d'un autre métal à 60°,5, la température du mélange devient 14°,6. On demande la chaleur spécifique de ce dernier métal.

(*Paris*, 1854.)

Problème 182. — Un vase de laiton pesant 30 grammes renferme un certain poids d'eau inconnu, à la température de 20°; on y plonge 40 grammes de fer à 100 degrés, et le mélange s'élève à la température de 20°,716; on demande quel est le poids de l'eau renfermée dans le vase.

On sait que la chaleur spécifique du fer est 0,1137 et celle du laiton 0,0939.

(*Paris*, 1858.)

Problème 183. — Dans $25^{kil},456$ d'eau à 12°,5, on met $6^{kil},17$ d'un corps à la température de 80°; le mélange prend une température de 14°,7; on demande la chaleur spécifique de ce corps. (*Nancy*, 1858.)

Problème 184. — Deux anneaux plats du même métal, qui pèsent : l'un 300 grammes, l'autre 350 grammes, ont été chauffés à la même température x inconnue, et plongés à cette température, le premier dans $940^{gr},8$ d'eau à 10°; le second dans 776 grammes d'eau à la même température de 10°. La température de l'eau dans le premier cas s'est élevée à 20° et dans le second à 30°. On admet que toute la chaleur perdue par le métal a été prise par l'eau dans les deux cas. On demande la température x et la chaleur spécifique du métal.

(*Poitiers*, 1857.)

Problème 185. — On mêle 1 kilogr. d'eau à 0° avec 1 kilogr. de mercure

à 100° ; on trouve que la température du mélange est de 3°. On demande quelle est la capacité calorifique du mercure comparée à celle de l'eau.

PROBLÈME 186. — Dans un calorimètre en tôle qui pèse 6 931^{gr},6, M. Regnault introduit 99 626^{gr},6 d'eau à la température de 11°,70. A cette eau, il mélange 10 059^{gr},8 d'eau portée à 107°,70 ; la température finale du mélange est 20°,50. On demande quelle est la chaleur spécifique moyenne de l'eau entre 20°,50 et 107°,70.

On sait que la chaleur spécifique de la tôle est 0,1138 et que, pendant la durée de l'opération, la température du mélange s'est abaissée de 0,03 sous l'influence du milieu ambiant.

PROBLÈME 187. — Un vase en laiton pesant 45 grammes renferme 400 grammes d'eau à 10°, on y plonge 100 grammes de fer chauffés à une température inconnue x ; la température finale du mélange est 11° centigrades. La chaleur spécifique du fer est 0,1137 ; celle du laiton, 0,0939. On propose de déterminer, d'après ces données, la valeur de la température initiale du fer. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 188. — On mêle 15 kilogrammes de mercure à 65°,2 avec 40^{kil},1 d'eau à 3°,4 ; on demande la température du mélange. On admet 0,03 pour la chaleur spécifique du mercure. L'eau est contenue dans un vase pesant 0^{kil},758 ; la chaleur spécifique de la substance qui forme le vase est $\frac{1}{12}$. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 189. — Combien faudra-t-il de kilogrammes d'or à 45° pour élever de 12°,3 à 15°,7 la température de 1^{kil},00058 d'eau ?
Capacité calorifique de l'or = 0,0298. (*Poitiers*, 1855.)

PROBLÈME 190. — 150 grammes de platine, à une température inconnue, sont plongés dans 470^{gr},4 d'eau à 10° ; ils en élèvent la température à 20°.

Puis 250 grammes du même platine à la même température, sont plongés dans 388 d'eau, et en élèvent la température de 10° à 30°.

Déterminer la chaleur spécifique et la température du platine employé dans les deux expériences. (*Poitiers*, 1860.)

PROBLÈME 191. — 3^{k},264 de fer sont plongés dans 8^{k},624 d'eau à 20° contenue dans un vase d'argent du poids de 2^{k},345. La chaleur spécifique du fer est de 0,114 ; celle de l'argent, 0,057 ; la température finale du mélange est de 25°. On demande la température initiale de la masse de fer. (*Nancy*, 1860.)

PROBLÈME 192. — On a une sphère de platine de 0,05 de rayon à 95° ; on la plonge dans 2 litres d'eau, à 4°. On demande la température de l'eau, lorsque l'équilibre s'est établi. La capacité calorifique du platine est 0,03351, le coefficient de dilatation linéaire 0,000008565, et la densité 21,53. (*Paris*, 1853.)

PROBLÈME 193. — Dans un vase de cuivre du poids de 100 grammes et contenant 500 grammes d'eau à la température de 10°, on a plongé un morceau de cuivre du poids de 400 grammes à une température inconnue. La température de

l'eau s'est élevée à 25°. On demande quelle était la température du cuivre au moment où on l'a plongé dans l'eau. La chaleur spécifique du cuivre est 0,1.
(*Limoges*, 1856.)

PROBLÈME 194. — Désignant par C et D la chaleur spécifique et la densité du mercure, et par C′ et D′ la chaleur spécifique et la densité de l'alcool, on propose de calculer le rayon extérieur x qu'il faut donner au réservoir cylindrique d'un thermomètre à alcool, pour que ce réservoir possède pour la chaleur une capacité égale à celle que possède le réservoir cylindrique d'un thermomètre à mercure donné, sachant que le rayon extérieur du réservoir de celui-ci est r, et supposant du reste un mode de construction tel que l'épaisseur de la paroi vitreuse soit la même dans les deux thermomètres.

PROBLÈME 195. — Déterminer la chaleur spécifique du marbre blanc :

M Poids du marbre = 130gr,46.

p Équivalent en eau de la corbeille qui contient le marbre = 0gr,601.

T Température du marbre = 96°,85.

A Poids de l'eau = 462gr,45.

θ Température finale maximum de l'eau = 9°,02. Température de l'air extérieur = 7°,4.

$\Delta\theta$ Accroissement de température produit = 5°,36.

t Temps écoulé depuis l'observation de la température initiale jusqu'à celle de la température maxima = 0h2m30s.

Valeur en eau du vase contenant l'eau et de son thermomètre = 5gr,70.

NOTA. — Ces nombres sont extraits d'un mémoire de M. Regnault sur les chaleurs spécifiques des corps composés. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1854.)

PROBLÈME 196. — On a deux morceaux de métal dont les capacités calorifiques sont inconnues. L'échantillon du premier métal pèse 2 kilogrammes. Il est chauffé à 80° ; l'échantillon du second métal pèse 3 kilogrammes et est chauffé à 50°. On plonge ces deux échantillons ainsi chauffés dans 1 kilogramme d'eau à 10° ; et la température finale du mélange est 26°,3.

On recommence l'expérience, en chauffant le premier métal à 100° et le second à 40°, et en les plongeant toujours ensemble dans un kilogramme d'eau à 10° ; cette fois la température finale est 28°,4.

On demande de déterminer, d'après ces données, les capacités calorifiques des deux métaux ; on néglige les pertes de chaleur qui se font à l'extérieur, ainsi que l'influence du vase dans lequel le mélange s'opère.
(CONCOURS GÉNÉRAL, 1860.)

PROBLÈME 197.—293gr,65 de zinc à la température de 99°,11 ont été plongés dans 462gr,39 d'eau distillée à 0°. Il résulte de cette immersion une variation de température de 5°, 22, le zinc étant renfermé dans une corbeille de laiton du poids de 8,48 qui partageait sa température, l'eau était contenue dans un vase en laiton du poids de 55gr,15 qui partageait la sienne. La température était donnée par un thermomètre qui contenait 7gr,62 de mercure et dont le verre pesait 1gr,27.

On demande quelle est la chaleur spécifique du zinc, celle du laiton étant 0,094 ; du mercure, 0,033 ; du verre, 0,198. (CONCOURS GÉNÉRAL, 1859.)
(Extrait du premier mémoire de M. Regnault sur les chaleurs spécifiques.)

PROBLÈME 198. — Combien faut-il jeter de glace à 0° dans 20 litres d'eau à 30° pour en abaisser la température à 10° ? (*Poitiers*, 1857.)

PROBLÈME 199. — On demande combien il faudrait de kilogrammes d'eau à 45° pour fondre sans changement de température 8 kilogrammes de glace à 0°. (*Paris*, 1855.)

PROBLÈME 200. — On a trouvé dans une expérience relative à la détermination de la chaleur latente de fusion de la glace les résultats suivants : Poids de l'eau servant au mélange (le vase et le thermomètre réduits en eau entrant dans ce résultat), 667gr,619; température initiale de cette eau, 28°,33; poids de la glace fondante, 65gr,657. On demande quelle a dû être la température finale du mélange, sachant que, sous l'influence du milieu environnant, cette température s'est élevée de 0°,12.

PROBLÈME 201. — Pour déterminer la chaleur latente du phosphore, M. E. Desains a fait fondre 66gr,698 de phosphore dans de l'eau chaude. La température s'est abaissée sous l'influence du milieu environnant, et est descendue beaucoup au-dessous du point de solidification du phosphore, sans que le retour à l'état liquide ait eu lieu. Tout à coup la solidification s'est opérée, la température s'est élevée, toutes corrections faites, de 20°,46. On demande quelle est la chaleur latente de fusion du phosphore : on sait que le poids d'eau, du vase et du thermomètre réduits en eau est 4gr,853, et que la chaleur spécifique du phosphore, soit solide, soit liquide, est égale à 0,200, à moins d'un millième près.

PROBLÈME 202. — Soit un mélange capable d'absorber 10 calories : combien se formera-t-il de grammes de glace si cette chaleur est prise tout entière à une masse d'eau dont la température est 5°, et le poids 1kil,80? (*Dijon*, 1855.)

PROBLÈME 203. — Quelle était la température d'une masse de 2 kilogrammes de cuivre qui, mise dans un bloc creux de glace, en a fondu 800 grammes. La chaleur spécifique du cuivre est égale à 0,1. (*Poitiers*, 1857.)

PROBLÈME 204. — Un corps qui fond à 10° est introduit dans 500 grammes d'eau à 30° ; la température finale du mélange est de 22°. On demande quelle est la chaleur latente de fusion du corps, son poids étant 7 grammes, sa température initiale 10°; la chaleur spécifique du liquide qu'il produit est 0,3; enfin l'eau se trouve contenue dans un vase de laiton dont la température initiale est aussi 10° et qui pèse 40 grammes. La chaleur spécifique du laiton est 0,09.

PROBLÈME 205. — Une caisse en métal du poids de 5kil,425 renferme 25kil,175

d'eau à 35°,25. On demande combien il faut y dissoudre de glace à 0° pour que la température de cette eau soit abaissée à 12°,42. La chaleur spécifique du métal est $\frac{1}{12}$.

Problème 206. — On plonge dans un bain de 20 litres d'eau à 80° centigrades une sphère en glace de 144 millimètres de rayon. Calculer la température du bain après la fusion de la glace, la chaleur latente étant 79,25, et le poids spécifique de la glace 0,93. (*Paris*, 1853.)

Problème 207. — Une masse d'eau pesant 45 kilogrammes est contenue dans un vase de cuivre du poids de 2^{kil},538; la température est 28°,5; on dissout 7^{kil},250 de glace à 0°. On demande la température du mélange, la chaleur spécifique du cuivre étant $\frac{1}{10}$. (*Paris*, 1858.)

Problème 208. — On demande le poids de glace qu'il faut mettre dans l'eau à 27°,4 pour ramener à 11°,5 une masse d'eau égale à 45 kilogrammes 5 hectogrammes, et contenue dans un vase de cuivre: la chaleur spécifique du cuivre est 0,094. (*Paris*, 1856.)

Problème 209. — La terre étant recouverte d'une couche de 2 centimètres d'épaisseur de neige à 0°, quelle est l'épaisseur de la couche de pluie tombant à 12°,15 qui serait nécessaire pour en déterminer la liquéfaction? On sait qu'un décimètre cube de cette neige pèse 0,783.

(Concours général, 1853.)

Problème 210. — On donne 300 litres d'eau à la température de 50°; avec quel poids de neige à 0° faut-il la mélanger pour que la température finale soit de 32°? (*Marseille*, 1860.)

Problème 211. — Une couche de neige a 1 centimètre d'épaisseur à 0°, combien devra-t-elle recevoir d'unités de chaleur solaire par mètre carré de surface pour passer à l'état de vapeur à 15°?

79,2 est la chaleur latente de fusion; 540 la chaleur latente de vaporisation; 0,68 la densité de la neige. (*Poitiers*, 1855.)

Problème 212. — On demande quel volume d'eau résulterait de la fonte d'une couche de neige qui recouvre une surface d'un hectare, sachant que l'épaisseur de la couche est de 8 centimètres et que le poids spécifique de la neige, un peu variable avec son état d'agrégation spontanée, est en moyenne de 0,692.

Problème 213. — On propose de trouver quelle quantité d'eau à + 100°, il faudrait ajouter à la couche de neige, dont il est question dans le problème précédent pour la fondre entièrement et donner de l'eau à 0°, sachant d'ailleurs que la chaleur spécifique de l'eau à l'état solide est de 0,5, et que cette neige se trouve à la température de — 12°.

Problème 214. — Combien faudra-t-il de kilogrammes de glace pour liquéfier et amener à 0° 3 kilogrammes de vapeur d'eau dans un appareil où la pression est $0^m,76$? On prendra 540 pour la chaleur latente de la vapeur.

(*Paris*, 1855.)

Problème 215. — On fait condenser dans 2 kilogrammes d'eau à 10°, 100 grammes de vapeur d'eau sous la pression de $0^m,76$ et l'on demande quelle sera la température finale du mélange. On admettra que la quantité de chaleur nécessaire pour volatiliser à 100° 1 kilogramme d'eau sous la pression de 0,76 est 537 calories.

Problème 216. — A quelle température amènerait-on 300 litres d'eau prise à 15° centigrades, en y faisant condenser 25 kilogrammes de vapeur d'eau bouillante à la pression ordinaire? On suppose que la chaleur latente de la vapeur est 537 calories. On ne tiendra pas compte de l'influence du vase.

(*Paris*, 1855.)

Problème 217. — On a un vase de cuivre pesant 300 grammes, ce vase contient 600 grammes d'eau; la température est 10°. On y fait parvenir 50 grammes de vapeur à 100° et on ajoute 100 grammes de glace à 0°; on demande la température finale du mélange.

Chaleur spécifique du cuivre = 0,095.

Problème 218. — Combien faut-il de kilogrammes de vapeur d'eau à 100° pour élever 40 litres du même liquide de 0° à 95°? La chaleur latente de la vapeur d'eau est 540.

Problème 219. — Un vase poreux contient de l'eau que l'on veut rafraîchir. La température est 20° et l'état hygrométrique est $\frac{1}{2}$, on demande quelle sera la température la plus basse à laquelle l'eau pourra descendre, en admettant que le vase ne s'échauffe ni par le rayonnement ni par le contact du milieu environnant.

On suppose que l'on ait à sa disposition la table des forces élastiques maxima de la vapeur d'eau.

Problème 220. — Dans un vase de cuivre pesant 400 grammes on introduit 60 grammes de glace à 0°, 20 grammes de vapeur d'eau à 100°, 600 grammes d'eau liquide à 10°. On demande la température finale du mélange.

Problème 221. On fait arriver dans un poids d'eau inconnu $5^k,37$ de vapeur d'eau à 100°, sous la pression de 0,76; on a ainsi porté la température de cette eau de 8°,5 à 30°,4. On demande le poids de cette eau. On sait que ce liquide était renfermé dans un vase métallique pesant $0^k,426$ et dont la chaleur spécifique est 0,1. (*Paris*, 1858.)

Problème 222. — Le corps de pompe d'une machine à vapeur a un diamètre intérieur de $1^m,90$; le piston a une course de $2^m,30$ et il bat 20 doubles

coups à la minute. La pression de la vapeur est de 1 atmosphère et demie, sa température de 112°,2. On demande quel est, par heure, le poids d'eau froide à 15° nécessaire à la condensation, pour que dans le condenseur la température se maintienne à 35°.

Ces nombres se rapportent à la machine d'un bâtiment à vapeur de 220 chevaux de force.

Problème 223. — On fait arriver de la vapeur d'eau à 100° dans un vase clos qui renferme 3 kilogrammes de neige à 0°. Il faut 372 grammes de vapeur pour fondre cette neige sans élever la température. Il faudrait $2^k,37$ d'eau à 100° pour en fondre la même quantité.

On demande la chaleur latente de vaporisation de l'eau et la chaleur latente de fusion de la glace. (*Poitiers*, 1860.)

Problème 224. — On distille de l'eau dans un alambic dont le réfrigérant a une capacité de $60^{lit},7$, l'eau y est introduite à 10° et on la renouvelle graduellement, de manière que l'eau qui entoure le serpentin se maintienne à la température moyenne de 30°. Combien de fois se sera renouvelée l'eau du réfrigérant, quand on aura distillé 10 kilogrammes d'eau ? L'eau distillée sort du serpentin à la température de 30° et y entre en vapeur à 100°. (On néglige la chaleur prise par le vase réfrigérant et celle qui se perd dans l'air ambiant pendant l'expérience.) (*Poitiers*, 1860.)

Problème 225. — On a refroidi de 30° à 10° un volume d'air saturé d'humidité, et qui occupe un volume de 500 litres sous 760 millimètres de pression.

1° Quel est le poids de la vapeur condensée ?

2° Quel sera le volume de l'air refroidi à 10° à la même pression ?

3° Quel est le nombre de calories dégagées ?

Densité de la vapeur d'eau, $\frac{5}{8}$ de celle de l'air.

Tension de la vapeur à 30°, $31^{mm},5$, à 10°, $9^{mm},2$.

Poids d'un litre d'air à 0° sous $0^m,76$, $1^g,293$.

Coefficient de dilatation de l'air, $\frac{1}{273}$. (*Paris*, 1858.)

Problème 226. — 30 kilogrammes d'eau sont renfermés dans une caisse de métal dont la chaleur spécifique est $\frac{1}{10}$, celle de l'eau étant l'unité. Cette caisse pèse $1^k,584$. On demande combien il faut de kilogrammes de vapeur d'eau à la pression de $0^m,76$ pour élever la température de cette eau de 12°,52 à 48°,68. On sait que la chaleur latente de la vapeur d'eau est 540. (*Paris*, 1856.)

Problème 227. — Une cuve cylindrique à fond plat et horizontal a $1^m,30$ de diamètre et $0^m,75$ de hauteur, mesurée à l'intérieur ; elle est à moitié pleine d'eau à la température de 4° et on chauffe ce liquide en y faisant arriver la vapeur à 100° fournie par $5^k,25$ d'eau. On demande quelle sera la température

du bain ainsi chauffé et quel en sera le volume; on négligera la température du vase et on prendra pour coefficient moyen de dilatation de l'eau $\frac{1}{2200}$.

(*Paris*, 1854.)

Problème 228. — Dans une machine à vapeur, on suppose la vapeur d'eau à 140°, l'eau froide à injecter dans le condenseur à 14°, et l'eau du mélange à 38°; on demande quel sera le poids d'eau nécessaire pour condenser un poids donné de vapeur. (*Paris*, 1858.)

Problème 229. — Une machine à vapeur de Newcomen (machine atmosphérique) donne 20 coups de piston par minute; le corps de pompe a une hauteur de 1m,20; le piston, un diamètre de 0m,80. Combien faut-il dépenser d'eau froide par heure pour en condenser la vapeur qui est à 100° sous le piston? L'eau froide injectée est prise à la température de 12°, et sort, après la condensation, à la température de 35°. La chaleur de vaporisation de l'eau est égale à 537 unités. La densité de la vapeur d'eau à 100°, sous la pression extérieure, est égale à 0,0006 de celle de l'eau. (*Poitiers*, 1857.)

Problème 230. — Combien faut-il d'eau froide à 0° pour condenser un volume de 1 000 litres de vapeur d'eau à 100° sous 0m,76, de façon que cette eau, par suite de la condensation de la vapeur, ne s'élève qu'à la température de 40°?
Chaleur latente de la vapeur d'eau à 100°, 536 calories. Poids du litre d'air sec à 0° sous 0m,76, 1gr,3. Densité de la vapeur d'eau, $\frac{5}{8}$ de celle de l'air. Coefficient de dilatation du gaz, $\frac{1}{273}$. (*Poitiers*, 1859.)

SECTION XI

DIVERS PROBLÈMES SUR LA CHALEUR

Problème 231. — L'air sec sous un volume de 10mcc, est à la température de 12°. On demande ce que deviendrait sa température si toute la chaleur que dégagent en brûlant 300 grammes d'huile de colza était employée à échauffer cette masse gazeuse.
On sait que l'huile de colza dégage en brûlant 9 307 calories par kilogramme. La chaleur spécifique de l'air est les 0,26 de celle de l'eau quand on prend les deux corps sous le même poids.

Problème 232. — Un vase en cuivre mince renfermant 250 grammes d'eau est à la température de 20° dans une enceinte qu'on maintient à 0° (dans ce chiffre est compris le poids d'eau nécessaire pour produire le même effet calorifique que le vase). S'il était abandonné à lui-même, il se refroidirait d'un degré dans la

première minute; mais il est traversé par un tube métallique contourné en spirale et d'une longueur suffisante pour que la vapeur qui y pénètre à 100° sous la pression d'une atmosphère s'y liquéfie en partie et prenne finalement la température du bain. On demande quel est le volume de vapeur qui doit passer par minute pour que la température de l'eau se maintienne invariablement à 20°.

PROBLÈME 233. — Les profondeurs de trois puits artésiens sont respectivement : $A = 220^m$, $B = 395^m$, $C = 543^m$; on demande : si pour ces trois puits il est exact de dire que l'accroissement de température soit proportionnel à l'accroissement de la profondeur. Quelle serait la température de l'eau fournie par C, si la loi précédente était exacte ? La température de l'eau est pour A de 19°,75, pour B de 25°,33, pour C de 30°,50.

PROBLÈME 234. — La profondeur d'où jaillit la colonne d'eau du puits artésien de Passy est de $586^m,5$: sa température a été trouvée de 28°. Sachant que la température moyenne de la couche terrestre située à 30 mètres au-dessous du sol est à Paris de 11°,8, on demande quelle est en moyenne l'épaisseur de la croûte terrestre qui correspond pour les terrains traversés à Passy à un accroissement de 1° dans la température.

PROBLÈME 235. — L'air d'une cheminée qui a 60 mètres de hauteur a une température moyenne de 100°, tandis que celle de l'air extérieur est à 0° ; on demande d'exprimer en millimètres de mercure le tirage de cette cheminée. On demande de plus quel serait le tirage si l'air extérieur était à 10°. On prendra pour coefficient de dilatation de l'air 0,00366. (*Paris*, 1858.)

PROBLÈME 236. — Le corps de pompe d'une machine à vapeur est de 753^{mm} de hauteur et de 428^{mm} de diamètre. On demande quel sera le poids de vapeur nécessaire pour le remplir lorsque la machine marchera avec la pression de 3 atmosphères.

Température de la vapeur = 134°.

Densité de la vapeur $= \frac{5}{8}$ de celle de l'air.

PROBLÈME 237. — Quel poids de charbon faudra-t-il brûler théoriquement pour que la machine précédente marche 12 heures dans les conditions indiquées : on sait, de plus, qu'elle donne 40 coups de piston par minute.

On supposera l'eau de la chaudière primitivement à 16°. — On sait que 1^k d'eau à 0° exige une quantité de chaleur représentée par $607 + \frac{1}{3}$ T pour passer de 0° à l'état de vapeur à T. On sait de plus que 1^k de charbon en brûlant dégage 6000 calories, dont la moitié se dissipe avec la fumée.

PROBLÈME 238. — Les dimensions d'un hygromètre à cheveu sont les suivantes :

Distance de l'axe de la poulie à l'extrémité de la pince qui porte le cheveu,

35 centimètres. Diamètre de la poulie, 8 millimètres. Longueur de l'aiguille, 7 centimètres. Distance de deux degrés successifs, $1^{mm},5$. On sait que c'est à une tige de laiton que la pince et l'axe de la poulie sont fixés. On a marqué le 100e degré, lorsque la température était $30°$; on demande à quel degré s'arrêterait l'instrument dans l'air saturé à la température de $0°$. On admettra, ce qui est suffisamment exact, que le cheveu ne change pas de longueur lorsque la température varie et on prendra pour coefficient de dilatation du laiton 0,0000188.

SECTION XII

PROBLÈMES D'ÉLECTRICITÉ ET DE MAGNÉTISME

PROBLÈME 239. — Lorsque l'on charge par influence un électroscope à feuilles d'or, on observe, qu'au moment où l'on retire le doigt que l'on avait posé sur le bouton, les lames divergent même avant que le corps électrisé qui provoque la charge soit enlevé. Comment pourrait-on reconnaître que la divergence est produite par de l'électricité de même nom que celle du corps? Pourquoi cette électricité se développe-t-elle? Où faudrait-il placer le doigt pour qu'elle ne fût pas développée?

PROBLÈME 240. — Une grosse épingle est implantée dans un bâton de résine ; on lui donne une charge d'électricité, et on la met en rapport avec un électroscope ordinaire dont les lames divergent. L'expérience est recommencée, mais avec un autre appareil : on met l'épingle ainsi chargée en rapport avec un excellent électroscope condensateur. Les opérations nécessaires pour la condensation sont exécutées ; et l'on trouve, après avoir enlevé le plateau supérieur, que les lames d'or ne divergent pas. Expliquer le phénomène.

PROBLÈME 241. — Un électroscope condensateur est chargé par une source mise en rapport avec le plateau inférieur, tandis que le plateau supérieur communique avec le sol. Ce dernier plateau étant enlevé, les lames divergent. Qu'arrivera-t-il, si, dans ces conditions, on vient à rétablir la communication entre la source et le plateau inférieur?

PROBLÈME 242. — Un électroscope condensateur est formé de trois plateaux métalliques qui sont vernis sur les faces qui se touchent : les deux plateaux supérieurs peuvent s'enlever à volonté. Comment utiliser cet appareil pour réaliser une double condensation de l'électricité et pour obtenir ainsi une divergence des lames qui n'aurait pas eu lieu avec l'électroscope condensateur ordinaire, en se servant d'ailleurs de la même source?

(Électroscope de PÉCLET.)

PROBLÈME 243. — Une source d'électricité est trop faible pour charger sensiblement un électroscope condensateur. Comment pourra-t-on utiliser un con-

densateur à très-large surface, pour donner au moyen de cette source une charge assez puissante à l'électroscope ?

(Méthode de M. Gaugain.)

Problème 244. — On a une sphère électrisée A ; à une certaine distance est placé un pendule isolé chargé d'électricité contraireet dont le poids est p, l'attraction est telle que le centre de la boule A et celui du pendule dévié sont sur une même horizontale et à une distance d.

On demande de calculer d, connaissant l'intensité de l'attraction exercée à l'unité de distance par la sphère sur le pendule.

Problème 245. — Une aiguille aimantée est traversée par un axe perpendiculaire à la ligne des pôles. Quelle position faut-il donner à cet axe pour que la terre ne déplace pas cette aiguille quelle que soit l'inclinaison qu'on lui donne?

(Aiguille astatique d'Ampère.)

Problème 246. — On fait tourner autour de son axe vertical le plan de la boussole d'inclinaison de 90 °à partir du plan du méridien magnétique. Trouver la courbe que tracerait le prolongement de l'aiguille sur le limbe horizontal qui supporte la boussole.

Problème 247. — Une cloche de verre pesant 20 grammes quand elle est vide est remplie d'eau et placée au-dessus des fils de platine d'un voltamètre. On l'attache à l'extrémité A du fléau d'une balance. L'eau du voltamètre recouvre entièrement la cloche, qui repose sur le fond du vase. En E, à une distance du point d'appui C du fléau, telle que $CE = \frac{AC}{2}$, est une boule de 16 grammes, pouvant glisser sans frottement sensible le long de CB, quand le fléau cesse d'être horizontal. Quelle est la quantité d'eau à décomposer pour que la cloche se soulève et que la boule E glisse le long de CB? — Le fléau est horizontal au commencement de l'expérience.

L'eau acidulée du voltamètre, à cette température, a une densité 1.

Densité de l'air, $\frac{1}{773}$ de celle de l'eau ; densité de l'oxygène par rapport à l'air, 1,1056 ; densité de l'hydrogène par rapport à l'air, 0,0693 ; densité du verre par rapport à l'eau, 2,50.

On tiendra compte de la perte du poids du verre plongé dans l'eau.

(*Poitiers*, 1860.)

Problème 248. — Un fil d'argent très-flexible, qui est attaché par l'un de ses bouts à un barreau aimanté fixe, est tenu à la main, mais assez librement pour qu'il puisse obéir aux actions qui le sollicitent. On fait passer un courant et on le voit aussitôt s'enrouler sur l'aimant. Expliquer le phénomène.

(Expérience de M. P. Le Roux.)

Problème 249. — Un rectangle est composé de deux métaux ; l'un forme le côté horizontal inférieur, l'autre forme les trois autres côtés. Ce rectangle est

mobile autour d'un axe passant par un de ses côtés verticaux, au-dessous duquel est placé un aimant vertical. Tout étant au repos, on place une lampe au-dessous du second côté vertical. Quel phénomène observera-t-on?

(Appareil de M. Cumming.)

Problème 250. — Une petite pile de Wollaston, fixée à une plaque de liége, flotte sur l'eau acidulée dans laquelle plongent les métaux qui la composent. Les rhéophores, qui s'élèvent au-dessus du liquide, sont réunis après avoir été recourbés de manière à former par leur ensemble une circonférence. Quels phénomènes pourra-t-on étudier avec cet appareil?

(Disposition imaginée par M. De La Rive.)

Problème 251. — Un électro-aimant porte deux fils enroulés : un bout de chacun des fils est en communication avec le pôle positif de la même pile. Il reste deux bouts libres ; l'un communique avec un fil de ligne télégraphique, l'autre avec la terre par un fil très-fin. Les dispositions ont été combinées de telle sorte que les deux courants qui circulent agissent pour aimanter l'électro-aimant avec une même force, mais en sens contraires, si bien que l'aimantation n'a pas lieu. Un appareil semblable est placé à une station éloignée et communique avec le même fil de ligne. Montrer que par cette disposition on peut théoriquement transmettre deux dépêches simultanées en sens contraires.

Problème 252. — Sur le cadre d'un galvanomètre s'enroulent deux fils égaux et placés dans la même position par rapport aux aiguilles. Le courant d'une pile, mise en rapport avec ces fils, se partage entre eux, de telle sorte que les deux courants qui circulent autour du cadre du galvanomètre sont de sens contraires ; l'aiguille reste au zéro. Mais l'un des courants partiels, après avoir quitté le galvanomètre et avant de se rendre à la pile, traverse le long fil d'une bobine, le second traverse de même un fil très-fin et très-court dont la résistance équivaut à celle de la bobine ; si bien que l'aiguille du galvanomètre reste encore au zéro. On demande comment cette disposition permettra de reconnaître l'induction d'un courant sur lui-même : 1° quand le courant commence, 2° quand le courant finit. (Méthode tirée d'un mémoire de M. Edlung.)

Problème 253. — Une aiguille aimantée horizontale oscille d'abord sous l'action de la terre et loin de tout corps métallique ; on la fait ensuite osciller en plaçant au-dessous d'elle une plaque de cuivre. Quel sera l'effet de l'intervention de cette plaque? (Observation de Gambey.)

Problème 254. — Une sphère de cuivre placée entre les pôles d'un électro-aimant, dont les branches sont convenablement écartées, est mise en mouvement de rotation autour d'un axe parallèle à la droite qui joint les pôles. Pourquoi éprouve-t-on une résistance très-grande à continuer le mouvement de rotation dès que l'électro-aimant est en activité ? D'où vient le développement de chaleur qui se manifeste sur la boule dans les mêmes circonstances ?

(Expérience de M. Foucault.)

Problème 255. — Le cadre d'une fenêtre est formé par quatre tiges métalliques assemblées. Elle est tournée vers le midi et les gonds qui la soutiennent sont à l'est. Quels sont les phénomènes électriques qui ont lieu au moment où on vient à l'ouvrir? au moment où on la ferme? Comment les reconnaître?

Problème 256. — Un électro-aimant droit est placé dans la direction de l'aiguille d'inclinaison ; on le retourne bout pour bout. Quels sont les phénomènes d'induction qui ont lieu? La terre s'oppose-t-elle au mouvement donné?

Problème 257. — Un cube de cuivre suspendu à un fil tordu, prend un mouvement de rotation par l'action du fil qui se détord. On le dispose entre les branches d'un électro-aimant très-puissant. Pourquoi le mouvement de rotation cesse-t-il aussitôt que l'on fait passer un courant énergique à travers l'électro-aimant?

Problème 258. — L'étincelle de la machine de M. Ruhmkorff passe à travers un courant de vapeur d'eau qui circule dans un appareil disposé pour que l'on puisse recueillir les gaz : on obtient de l'hydrogène et de l'oxygène mélangés ; mais l'oxygène se dégage en plus grande quantité sur le fil qui amène l'électricité positive, l'hydrogène en plus grande quantité sur l'autre fil. Expliquer comment le passage de l'étincelle peut produire cette décomposition.

(Expérience de M. Perrot.)

Problème 259. — Deux lames de plomb de plusieurs décimètres carrés sont séparées par une toile grossière ; leur ensemble forme un rouleau que l'on plonge dans de l'eau acidulée. Plusieurs appareils semblables sont placés à la suite l'un de l'autre et réunis comme des éléments de pile. L'une des lames extrêmes est mise en rapport avec le pôle positif d'une petite pile, l'autre lame extrême en rapport avec le pôle négatif. Puis, les pôles étant enlevés, on fait communiquer les deux lames par un fil métallique : une étincelle jaillit. Expliquer la cause de ce phénomène.

(Expérience de M. Planté.)

SECTION XIII

ACTIONS MOLÉCULAIRES. — ACOUSTIQUE

Problème 260. — Une boule massive de verre est plongée dans l'acide sulfurique. On demande quelle est en atmosphères la pression à laquelle le liquide et la boule qui y est immergée devraient être soumis pour que celle-ci pût venir flotter à la surface du liquide.

On donne le coefficient de compressibilité du solide, 0,0000024 ; et celui du liquide, 0,0000320 ; la densité du verre, 2,5 ; celle de l'acide, 1,84.

Problème 261. — Une corde vibrant tout entière donne la note $ré_3$ quand elle est tendue avec un poids de 235 grammes ; par quel poids faudrait-il la tendre

pour qu'elle rendit la note si_2? En la laissant chargée de ce nouveau poids, quelle longueur faudrait-il lui donner pour qu'elle donnât *ut* dièze?

PROBLÈME 262. — Une corde de cuivre de $1^{mm},25$ de diamètre et une corde de platine de $0^{mm},75$ de diamètre sont tendues par des poids égaux. On demande quel rapport on devra établir entre les longueurs des cordes, si l'on veut que le son de la corde de cuivre étant représenté par *ut*, celui de la corde de platine le soit par *fa* dièze ; la densité du cuivre est 8,95, celle du platine 22,06. (Concours général de 1859.)

PROBLÈME 263. — Une corde de cuivre est tendue sur un sonomètre par un poids de 900 grammes ; elle fait entendre le si_3 quand elle vibre dans toute sa longueur. On demande quelle tension il faudrait donner à une corde de fer de même longueur et de même section pour qu'elle fît entendre le la_3. On donne la densité du cuivre 8,9 et celle du fer 7,7.

PROBLÈME 264. — Une corde métallique fait entendre le *ré* quand elle vibre dans toute sa longueur. Quelles fractions de sa longueur faut-il faire vibrer successivement pour qu'elle rende d'abord le *sol*♯, puis le *si*♭ de la même gamme?

PROBLÈME 265. — On partage l'intervalle d'octave en 12 intervalles égaux entre eux qu'on nomme demi-tons. On demande quelle est la valeur numérique du demi-ton ainsi défini.

PROBLÈME 266. — Un tuyau d'orgue ouvert à sa partie supérieure fait entendre le cinquième harmonique qui est le si_3. On demande quel est le son fondamental que doit rendre ce tuyau.

PROBLÈME 267. — Le troisième harmonique que fait entendre un tuyau ouvert est $ré_3$. On demande quelle est la longueur approchée de ce tuyau en la comptant depuis la bouche jusqu'à l'ouverture supérieure.

PROBLÈME 268. — L'étude de l'organe de la voix a fait reconnaître que l'on peut généralement prononcer quatre syllabes en une seconde. On demande de trouver à quelle distance un observateur devra se placer d'un écho pour que cet observateur puisse prononcer cinq syllabes durant le temps qui s'écoule entre le moment où il commence à émettre le son et celui du retour de la première syllabe.

SECTION XIV

PROBLÈMES D'OPTIQUE

PROBLÈME 269. — Quelle est la longueur du cône d'ombre projeté par la terre éclairée par le soleil, et quel est le diamètre de la section faite dans ce cône à une distance de la terre égale à celle de la lune?

Le rayon du soleil égale 112 rayons terrestres; la distance du soleil à la terre, 24 000 rayons terrestres; la distance de la lune à la terre, 60 rayons terrestres.

On ne tiendra pas compte de la réfraction atmosphérique qui diminuerait les dimensions du cône cherché. (*Nancy*, 1857.)

PROBLÈME 270. — Une lampe et une bougie sont distantes l'une de l'autre de $4^m,15$, et on sait que les intensités des deux lumières sont entre elles comme 6 est à 1. A quelle distance de la lampe sur la ligne droite qui joint les deux lumières doit-on placer un écran pour qu'il soit également éclairé par l'une et par l'autre? (*Paris*, 1856.)

PROBLÈME 271. — Un corps opaque est éclairé par une bougie et par une lampe. Les ombres projetées par ce corps sur un écran ont la même intensité.

Les distances à l'écran sont : pour la bougie, 1 mètre; pour la lampe, $2^m,50$. Quel est le rapport des intensités des deux lumières? (*Poitiers*, 1860.)

PROBLÈME 272. — Deux sources lumineuses ont leurs intensités dans le rapport de 5,7 à 2; elles sont placées à une distance de 2 mètres l'une de l'autre. On demande en quel point de la ligne qui les joint doit être placé un écran pour qu'il soit également éclairé par les deux lumières.

PROBLÈME 273. — Un spectateur qui tient ouvert un œil seulement, se regarde dans un miroir plan de trop petites dimensions pour qu'il puisse voir sa figure toute entière. Quelle sera l'étendue qu'il pourra en apercevoir?

PROBLÈME 274. — L'arbre d'une sirène acoustique porte un miroir plan, mince, poli sur ses deux faces, et parallèle à l'axe de l'arbre.

La sirène rend un son caractérisé par 690 vibrations simples à la seconde, le plateau mobile est percé de 15 trous; une source de lumière fixe envoie sur le miroir un faisceau de rayons parallèles horizontaux et dirigés vers l'axe de rotation. On demande quel chemin parcourt en une minute un point du faisceau réfléchi situé à 4 mètres de l'axe de la sirène : cet axe est supposé vertical.

(CONCOURS de logique scientifique, 22 juillet 1861.)

PROBLÈME 275. — Un objet est placé devant une lentille, son image est reçue sur un écran. Démontrer que la lumière émanée de cette image formera une image nouvelle qui coïncidera avec l'objet et lui sera égale. Comment pourrait-on constater le fait par expérience? Quel inconvénient y aurait-il à employer un miroir plan comme écran? quel avantage trouverait-on à prendre comme écran un miroir concave?

(M. FOUCAULT, Vitesse de la lumière.)

PROBLÈME 276. — Un point lumineux envoie un rayon qui frappe un miroir plan tournant autour d'un axe vertical, et qui se réfléchit. Le rayon réfléchi tombe perpendiculairement sur un second miroir plan, revient alors sur

lui-même, atteint de nouveau le miroir tournant, et retourne vers le point lumineux. Quelle doit être la vitesse du miroir tournant pour que le rayon de retour passe à $0^{mm},1$ du point lumineux. Distance du point lumineux au miroir tournant, $2^{m},5$; distance des deux miroirs, 3 mètres.

(M. FOUCAULT, Vitesse de la lumière.)

PROBLÈME 277. — Un miroir plan est fixé à une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical. Au-devant du miroir et parallèlement à sa direction est disposée une règle divisée en centimètres à droite et à gauche d'un point marqué 0. Une lunette perpendiculaire à la règle placée au point 0 permet de viser l'image des divisions. On voit d'abord la division 0 en coïncidence avec la croisée des fils de la lunette. Mais l'aiguille ayant subi une déviation, le miroir tourne avec elle, et à travers la lunette on voit la division 20. On demande de déterminer l'angle de déviation. On sait que la distance de l'échelle au miroir est de 3 mètres.

(Méthode de GAUSS pour la mesure des petites déviations.)

PROBLÈME 278. — Indiquer : 1° le nombre et la position des images produites par un corps lumineux placé entre deux miroirs inclinés entre eux de 45°; 2° le nombre et la position des images entre deux miroirs parallèles distants de 5 mètres, le corps lumineux étant supposé placé dans leur intervalle, à 2 mètres de l'un d'eux. (*Nancy*, 1858.)

PROBLÈME 279. — Des rayons parallèles arrivent sur un miroir sphérique concave : l'œil est placé un peu au delà du foyer principal de manière à recevoir tous les rayons réfléchis ; il voit alors le miroir entièrement éclairé, car la lumière lui vient de tous les points de ce miroir. L'observateur étant dans cette position, on fait passer un écran perpendiculairement à l'axe et dans le plan du foyer principal : à un moment donné toute lumière est interceptée. Quand tous les rayons réfléchis rencontrent l'axe tous au même point, la lumière disparaît subitement : on demande l'explication de ce fait.

Quand le miroir présente l'aberration de sphéricité ordinaire, l'ombre se fait peu à peu et commence par le bord inférieur si l'écran descend. Quelle en est la raison? Qu'arriverait-il si le miroir présentait une éminence accidentelle dans l'un des points de sa surface?

(Mémoire de M. L. FOUCAULT, sur la construction des miroirs.)

PROBLÈME 280. — L'indice de réfraction du verre que forme un prisme en flint-glass est égal à 1,576. On demande quelle est la valeur minimum de l'angle réfringent de ce prisme pour laquelle aucun des rayons lumineux tombant sur l'une des faces ne pourra émerger par l'autre.

PROBLÈME 281. — Une bougie est placée entre le centre et le foyer principal d'un miroir concave et son image nette va se peindre grossie et renversée sur un mur situé au loin. Cachée en partie par un petit disque opaque, cette bougie ne peut envoyer de lumière que sur le miroir, elle n'en envoie pas directement

vers la muraille. Sur le trajet des rayons lumineux, entre le mur et le miroir, on interpose un écran percé d'une petite ouverture, derrière laquelle on dispose à une petite distance une feuille de papier. On observe alors sur cette feuille une image renversée et très-nette de la bougie. Expliquer ce phénomène.

PROBLÈME 282. — Entre le foyer principal et le centre d'un miroir sphérique concave se trouve placée une bougie; indépendamment de l'image réelle et renversée qui se forme au delà du centre, un spectateur peut encore apercevoir une image droite et agrandie de la même bougie quand il regarde dans le miroir. Expliquer le phénomène.

PROBLÈME 283. — Une flèche de $0^m,15$ de longueur est placée devant un miroir concave, dans une direction perpendiculaire à l'axe principal, et elle se trouve divisée en deux parties égales par cet axe; sa distance au miroir est de 5 mètres. On demande à quelle distance de ce miroir se formera son image et quelle sera la grandeur de cette image. Le miroir a un rayon de courbure égal à $1^m,80$.

PROBLÈME 284. — Le miroir métallique que lord Ross emploie dans son télescope a $1^m,33$ de diamètre et $16^m,76$ de distance focale; on demande de calculer :

1° L'ouverture angulaire de ce miroir;

2° Le diamètre de l'image solaire réelle que donne ce miroir, sachant que le disque solaire sous-tend un angle moyen de 32′ 3″ et que la distance qui sépare la terre du soleil est égale à 215 fois le diamètre de ce dernier;

3° La longueur focale principale d'un oculaire qui donne un grossissement de 1 000 fois.

PROBLÈME 285. — Un rayon de lumière blanche tombe obliquement sur l'une des faces de l'angle droit d'un prisme à réflexion totale, il subit une première réfraction et se colore. Démontrer que le rayon émergeant par l'autre face après la réflexion totale sortira sans coloration.

PROBLÈME 286. — Un prisme à réflexion totale n'est pas isocèle; démontrer que les rayons de lumière blanche qui ont subi la réflexion totale émergeront en donnant un spectre.

PROBLÈME 287. — Une lentille plan-convexe est étamée comme une glace sur sa face plane. Quelle sera l'image d'un objet placé devant la partie convexe de cette lentille?

PROBLÈME 288. — Pour redresser l'image donnée par l'objectif d'une lunette, on emploie deux lentilles convergentes dont nous avons indiqué la fonction en décrivant la lunette terrestre. On demande comment un seul verre convergent devrait être placé pour remplir le même but.

NOTA. — En pratique, l'ensemble des deux verres est préféré pour éviter les déformations de l'image.

Problème 289. — Quand un myope regarde avec une lorgnette de spectacle dont un presbyte vient de se servir, il est obligé de changer la mise au point. Devra-t-il enfoncer ou tirer l'oculaire? Le rechercher 1° au moyen de la construction géométrique, 2° en appliquant les formules des lentilles.

Problème 290. — Comment peut-on éclairer la rétine avec un miroir concave? L'image de la rétine éclairée se forme en dehors de l'œil. Comment peut-on voir cette image avec une loupe? Pourrait-on l'examiner avec une lentille divergente? (Ophthalmoscope de M. Helmhotz.)

TABLE DES MATIÈRES

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Phénomènes physiques, 1. — Phénomènes chimiques, 2. — Observation et expérience, 2. — Division du cours, 2.

LIVRE PREMIER

Généralités sur les corps et sur les forces

CHAPITRE I. — Généralités sur les corps

Divisibilité de la matière, 3. — Compressibilité, 3. — Porosité, 3. — Élasticité, 4. — Trois états de la matière, 4. — État solide, 4. — État liquide, 5. — État gazeux, 6.

CHAPITRE II. — Généralités sur les forces.

Forces, 6. — Dynamomètres, 7. — Mouvement uniforme, 8. — Mouvement varié, 8. — Mouvement uniformément varié. Accélération, 9. — Proportionnalité des forces aux accélérations, 12. — Masse d'un corps. Densité, 12. — Représentation géométrique des forces, 14. — Composition des forces concourantes, 14. — Composition des forces parallèles, 15. — Centre des forces parallèles, 16. — Travail des forces, 17. — Principe de la transmission du travail, 18.

LIVRE DEUXIÈME

Pesanteur

CHAPITRE I. — Action générale de la pesanteur sur les corps.

I. — De la pesanteur. — Fil à plomb, 20. — Poids d'un corps, 21.
II. — Point d'application de la pesanteur. — Centre de gravité, 21. — Équilibre d'un corps placé sur un plan horizontal, 22. — Équilibre instable, 23. — Équilibre indifférent, 23 — Équilibre stable, 23. — Détermination du centre de gravité, 24.
III. — Intensité de la pesanteur. — Chute des corps — Tous les corps tombent avec

la même vitesse dans le vide, 25. — Machine d'Atwood, 26. — Loi des espaces, 27. — Lois des vitesses, 28. — Proportionnalité des forces aux vitesses, 29. — Mouvement uniformément retardé, 30. — Formules du mouvement uniformément varié, 31. — Machine de M. Morin, 31. — Intensité de la pesanteur, 33. — Pendule simple, 34. — Lois des oscillations pendulaires, 35. — Pendule composé. Centre d'oscillation, 35. — Vérification expérimentale des lois, 36. — Mesure de l'accélération de la pesanteur, 36. — Longueur du pendule qui bat la seconde, 37. — Application du pendule à la mesure du temps, 38. — Expérience de M. Foucault, 38.

IV. — Poids des corps. — Balance. — Théorie de la balance, 39. — Condition pour que la sensibilité soit indépendante de la charge, 40. — Conditions de sensibilité, 41. — Conditions d'exactitude d'une balance, 43. — Méthode des doubles pesées, 44.

V. — Mesure des longueurs. — Vernier, 44. — Cathétomètre, 45.

CHAPITRE II. — Hydrostatique. — Conditions d'équilibre des liquides sous l'action de la pesanteur.

Principe de Pascal, 47. — Égale transmission des pressions dans tous les sens, 47. — Presse hydraulique, 48. — Direction et grandeur des pressions dans l'intérieur des masses liquides, 50. — *Conséquences du principe de Pascal :* Tranches de niveau, 51. — Variation de la pression avec la profondeur, 52. — Horizontalité de la surface libre dans un liquide, 53. — Surface de séparation de deux liquides de densités différentes, 54. — Pression sur le fond des vases, 54. — Pression sur les parois latérales des vases, 56. — Paradoxe hydrostatique, 57. — Équilibre des liquides dans les vases communiquants, 58. — Niveau d'eau, 60. — Niveau à bulle d'air, 60.

CHAPITRE III. — Pressions exercées par les liquides sur les corps immergés. — Mesure des densités.

Principe d'Archimède, 62. — Conséquences du principe d'Archimède, 64.

Poids spécifiques. — Détermination des poids spécifiques des solides et des liquides, 67. — Méthode de la balance hydrostatique, 67. — Méthode du flacon, 68. — Méthode des aréomètres, 69. — Aréomètre de Nicholson, 69. — Aréomètre de Fahrenheit, 70. — Pèse-sels, pèse-acides, graduation, 71. — Pèse-esprit, pèse-éther, pèse-bière, 72. — Alcoomètre centésimal, 72. — Principe des volumètres, 73. — Autre graduation des volumètres, 75. — Densimètres, 76. — Cas particuliers concernant la mesure des poids spécifiques, 76.

CHAPITRE IV. — Conditions d'équilibre des gaz sous l'action de la pesanteur.

Expansibilité des gaz, 78. — Grande compressibilité des gaz, 80. — Pesanteur de l'air et des gaz, 80. — Principe de Pascal appliqué aux gaz, 81.

Baromètres. — Expériences de Torricelli et de Pascal, 83. — Théorie du baromètre, 84. — Évaluation numérique de la pression atmosphérique, 85. — Baromètre normal, 86. — Baromètre à cuvette ordinaire, 87. — Baromètre de Fortin, 88. — Emploi de l'instrument, 89. — Correction provenant de la capillarité, 90. — Baromètre de Gay-Lussac, 93. — Baromètre à cadran, 94. — Baromètre métallique de Bourdon, 94. — Mesure des hauteurs par le baromètre, 95. — Hauteur de l'atmosphère, 96.

CHAPITRE V. — COMPRESSIBILITÉ DES GAZ.

I. — LOI DE MARIOTTE. — Démonstration expérimentale, 97. — Autre forme de la loi de Mariotte, 100. — Inégale compressibilité des gaz. — Expérience de M. Despretz, 100. — Expériences de Dulong et Arago, 101. — Méthode de M. Regnault, 102. — Résultats obtenus, 101. — Conclusion générale, 105.

II. — MÉLANGE DES GAZ. — Expérience de Berthollet, 106. — Loi du mélange des gaz, 106.

III. — DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES. — Première loi. — Coefficient de solubilité, 108. — Seconde loi, 109. — Indication des coefficients de solubilité des principaux gaz, 110.

IV. — APPLICATION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AUX GAZ. — Baroscope, 110. — Correction due à la poussée de l'air dans les pesées, 111. — Aérostats, 111. — Mesure de la force ascensionnelle, 114.

CHAPITRE VI. — APPLICATION DE LA LOI DE MARIOTTE. — MANOMÈTRES. — MACHINE PNEUMATIQUE. — MACHINE DE COMPRESSION.

I. — MANOMÈTRES. — Manomètre à air libre, 116. — Manomètre à air comprimé, 117. — Manomètre métallique de Bourdon, 119.

II. — MACHINE PNEUMATIQUE. — Premiers essais, 120. — Description de la machine, 120. — Jeu de la machine. — Loi de la raréfaction, 121. — Espace nuisible, 122. — Double corps de pompe, 123. — Robinet, 125. — Éprouvette, 126. — Perfectionnement dû à M. Babinet, 126. — Corps de pompe à double effet, 129. — Crève-vessie, 130. — Hémisphères de Magdebourg, 130. — Jet d'eau dans le vide, 130.

III. — MACHINE ET POMPE DE COMPRESSION. — Machine ordinaire, 131. — Limite de condensation, 131. — Pompe de compression, 132. — Pompes accouplées, 133.

IV. — VOLUMÉNOMÈTRE. — Voluménomètre de M. Regnault, 134.

CHAPITRE VII. — APPAREILS SERVANT A PRODUIRE LE MOUVEMENT DES LIQUIDES SOUS L'INFLUENCE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. — POMPES. — SIPHON.

I. — POMPES. — Pompe aspirante, 136. — Limite de hauteur du tuyau d'aspiration, 137. — Mesure de l'effort nécessaire à la manœuvre de la pompe, 138. — Évaluation du travail, 138. — Écoulement continu, 139. — Pistons, 139. — Soupapes, 140. — Pompe foulante, 140. — Pompe aspirante et foulante, 140. — Pompe à incendie, 141.

II. — SIPHON. — Théorie du siphon, 141. — Manière d'amorcer un siphon, 142. — Vase de Tantale, 143.

LIVRE TROISIÈME

Chaleur

CHAPITRE I. — THERMOMÉTRIE.

Faits d'expérience servant de point de départ, 144. — Température, 145. — Thermomètre, 146. — Choix de la substance thermométrique, 146. — Réservoir, et tube du thermomètre à mercure, 147. — Construction, 148. — Graduation, 149. — Compara

bilité des thermomètres à mercure, 150. — Différentes échelles thermométriques, 151. — Sensibilité des thermomètres, 151. — Thermomètre à alcool, 152. — Variation des points fixes, 152. — Thermomètre à maxima et à minima de Bellani, 153. — Thermomètre à maxima de M. Walferdin, 153. — Thermomètre à minima de M. Walferdin, 154. — Thermomètre différentiel de Leslie, 155. — Pyromètre de Wedgwood, 155. — Pyromètre de Brongniart, 156.

CHAPITRE II. — Dilatation des corps.

Notions préliminaires, 157. — Coefficient de dilatation, 157. — Problèmes généraux des dilatations, 158.

Dilatation des solides. — Relation entre la dilatation cubique et la dilatation linéaire d'un même corps, 161. — Détermination des coefficients de dilatation linéaire, 162. — Méthode de Lavoisier et Laplace, 162. — Détermination directe du coefficient de dilatation cubique des solides, 165. — Résultats numériques. — Table des coefficients de dilatation linéaire et de dilatation cubique, 166. — Dilatation des cristaux, 168.

Dilatation des liquides. — Relation entre les coefficients de dilatation apparente et de dilatation absolue des liquides, 170. — Coefficient de dilatation absolue du mercure. — Expériences de Lavoisier et Laplace, 171. — Mesure de la capacité d'un réservoir thermométrique et des divisions de la tige, 171. — Expériences de Dulong et Petit, 172. — Thermomètre à poids, 175. — Mesure de la dilatation absolue des liquides autres que le mercure, 177. — Dilatabilité des liquides qui entrent en ébullition à une basse température, 181. — Phénomènes particuliers présentés par l'eau, 182. — Maximum de densité de l'eau. — Expérience de Hope, 182. — Expérience de M. Despretz, 183.

Dilatation des gaz. — Coefficient de dilatation des gaz. — Méthode de Gay-Lussac, 185. — Expériences de Rudberg, 187. — Méthode de M. Regnault, 187. — Résultats généraux, 191. — Conclusions générales, 192.

Application des dilatations. — Pressions développées par les corps solides au moment de leur dilatation et de leur contraction, 192. — Thermomètre métallique de Bréguet, 194. — Pendule compensateur, 194. — Correction barométrique, 196. — Comparabilité des thermomètres à mercure en tenant compte de la dilatation de l'enveloppe, 197. — Comparabilité du thermomètre différentiel de Leslie, 198.

Densité des gaz. — Définition, 198. — Méthode générale, 199. — Corrections. — Perfectionnements apportés par MM. Dumas et Boussingault, 200. — Méthode de M. Regnault, 201. — Poids du litre d'air dans les conditions normales, 203. — Densité des gaz qui attaquent le mercure, 204.

Corrections des densités des solides et des liquides. — Méthode de la balance hydrostatique, 205. — Influence exercée par la poussée de l'air sur les poids gradués, 207.

Pyromètres à gaz. — Méthode de MM. H. Deville et Troost, 208.

CHAPITRE III. — Changement d'état des corps.

Fusion. — Première loi de la fusion. — Température fixe de la fusion, 209. — Production des températures élevées pour déterminer la fusion des corps, 210. — Deuxième loi de la fusion. — Chaleur latente de fusion, 214. — Dissolution, 214. — Mélanges réfrigérants, 214. — Changements de volume au moment de la fusion, 216.

Circonstances qui modifient les lois de la fusion. — Des corps qui deviennent pâteux, 218. — Influence de la pression sur le point de fusion de la glace, 218.

Solidification. — Première loi de la solidification : Température fixe de la solidification,

220. — Deuxième loi de la solidification, 222. — Cas particulier que présente l'eau au moment de sa solidification, 222. — Cristallisation, 223.

Vaporisation. — Notions générales, 223. — Formation des vapeurs dans le vide, 224. — Première loi, 224. — Deuxième loi, 225. — Troisième loi, 226. — Distinction entre les vapeurs saturées et les vapeurs non saturées, 226. — Identité des gaz et des vapeurs, 227.

Tension de la vapeur d'eau aux diverses températures. — I. Tensions de la vapeur aqueuse entre — 32° et + 50°. Méthode de Dalton, 228. — II. Forces élastiques de la vapeur d'eau au-dessous de zéro. — Principe du condenseur de Watt, 230. — Méthode de Gay-Lussac, 230. — III. Tension de la vapeur aqueuse entre + 50° et + 230°, 231. — Résultats généraux, 233. — Formules empiriques, 233. — Hypsomètre, 234.

Mélange des gaz et des vapeurs. — Tension des vapeurs dans les gaz, 234. — Appareil de Gay-Lussac, 235. — Appareil de M. Regnault, 236. — Conséquences de la loi de Dalton, 236. — Densités des vapeurs, 237.

Ébullition. — Ébullition, 238. — Lois de l'ébullition, 238. — Congélation de l'eau dans le vide, 239. — Circonstances qui influent sur la température de l'ébullition : 1° influence de la pression atmosphérique, 239. — 2° Influence de la profondeur du liquide dans le vase, 240. — 3° Influence de la pureté du liquide, 241. — 4° Action exercée par la paroi du vase, 241. — 5° Influence exercée par la viscosité du liquide, 241.

Distillation. — Alambics, 243. — Méthode des distillations fractionnées, 244. — Marmite de Papin, 246. — Expériences de Cagniard-Latour, 247. — Caléfaction des liquides, 247.

Évaporation. — Phénomène de l'évaporation, 249. — Circonstances qui influent sur la rapidité de l'évaporation, 249. — Production du froid par l'évaporation, 250.

Liquéfaction des gaz. — Idées théoriques concernant la liquéfaction des gaz, 250. — Première méthode : Refroidissement des gaz, 251. — Deuxième méthode : Compression du gaz par lui-même, 251. — Production des froids les plus intenses que l'on connaisse, 253. — Troisième méthode : Compression d'un gaz par des actions mécaniques étrangères, 253.

Hygrométrie. — But des hygromètres, 255. — Trois méthodes hygrométriques, 255. — Hygromètre à cheveu de Saussure, 256. — Construction des tables, 257. — Comparabilité des hygromètres, 258. — Hygromètre de condensation, 259. — Hygromètre de Daniell, 260. — Hygromètre de M. Regnault, 261. — Méthode chimique, 262.

CHAPITRE IV. — Calorimétrie.

Chaleurs spécifiques. — Unité de chaleur, 263. — Méthode du puits de glace, 264. — Méthode des mélanges, 265. — Perfectionnements apportés à la méthode des mélanges par M. Regnault, 267. — Chaleur spécifique des liquides, 270. — Loi de Dulong et Petit, 271. — Exceptions à la loi précédente, 272. — Loi concernant les corps composés, 272.

Chaleurs latentes. — Chaleur latente de fusion, 273. — Méthode générale, 273. — Détermination de MM. de La Provostaye et Desains, 273. — Chaleur latente de vaporisation, 274. — Méthode des mélanges, 274. — Perfectionnements dus à M. Regnault, 276. — Résultats généraux, 278.

Chaleur dégagée dans les actions chimiques. — Chaleur dégagée dans les combustions, 279. — Calorimètre de MM. Favre et Silberman, 280. — Résultats obtenus, 281.

Chaleur dégagée par les actions mécaniques. — Chaleur dégagée dans le frottement. — Expérience de M. Joule, 282. — Résultats, 284. — Équivalent mécanique de la chaleur, 284.

CHAPITRE V. — Chaleur rayonnante.

Expérience de Rumford, 285. — Division du sujet, 285. — Propagation, 286. — Lois de

la réflexion, 286. — Miroirs paraboliques, 287. — Appareil de Leslie, 289. — Loi de Newton, 290. — Conséquences importantes de la loi de Newton, 291.
Expériences de Leslie. — Pouvoirs émissifs, 292. — Influence de l'épaisseur, 293. — Pouvoirs réfléchissants, 293. — Pouvoirs absorbants, 294. — Égalité des pouvoirs émissifs et absorbants, 295. — Applications des études précédentes, 296.
Appareil de Melloni. — Thermomètre différentiel de Nobili et de Melloni, 297. — Sensibilité, 298. — Appareil de Melloni, 299. — Graduation, 299.
Des diverses espèces de chaleur. — Transparence des corps pour la chaleur, 300. — Transmission à travers le sel gemme, 302. — Réfraction de la chaleur, 302. — Analogies de la chaleur et de la lumière, 303.
Diffusion. — Diffusion, 304.
Pouvoirs réfléchissants. — Disposition de l'expérience, 305. — Influence de la source, 306. — Réflexion sous diverses incidences, 307.
Pouvoirs émissifs. — Pouvoirs émissifs, 308. — Influence de l'état physique du corps, 309. — Influence de la température, 309. — Influence de l'inclinaison, 309.
Pouvoirs absorbants. — Pouvoirs absorbants, 311. — Pouvoirs absorbants déduits des pouvoirs émissifs, 312. — Méthode directe, 312.
Identité de la chaleur rayonnante et de la lumière. — Récapitulation, 313. — Expériences de MM. Jamin et Masson, 314. — Identité de la chaleur rayonnante et de la lumière, 314.

CHAPITRE V *bis*. — Conductibilité.

Notions préliminaires, 316.
Conductibilité des corps solides. — Appareil d'Ingenhousz, 316. — Thermomètre de contact de Fourier, 317. — Indications fournies par l'analyse mathématique, 318. — Expériences de M. Despretz, 319. — Coefficients de conductibilité. — Leur mesure, 320. — Méthode de MM. Wiedemann et Franz, 320. — Pouvoirs conducteurs des substances solides usuelles autres que les métaux, 322. — Propagation de la chaleur dans les cristaux, 322.
Conductibilité des liquides. — Échauffement d'une colonne liquide par la partie inférieure, 323. — Échauffement d'une colonne liquide par la partie supérieure. — Expériences de M. J. Murray, 324. — Expériences de M. Despretz, 324.
Conductibilité des gaz. — Difficultés qui se présentent dans l'étude de la conductibilité des gaz, 325. — Imparfaite conductibilité des gaz, 326.

CHAPITRE VI. — Applications.

I. Machines a vapeur. — Papin, 326. — Machine de Cawley, Newcomen et Savery, 327. — Perfectionnements, 328.
Machines perfectionnées par Watt. — Watt, 329. — Condenseur, 329. — Accessoires, 330. — Machine à double effet, 331. — Machine à haute et à moyenne pression, 332. — Bielle et manivelle, 332. — Tiroir, 333. — Excentrique, 334. — Détente de la vapeur, 334. — Machine sans condenseur, 335. — Classification des machines, 336. — Chaudières des machines à vapeur, 336. — Chaudières à bouilleurs, 336. — Manomètre, 337. — Appareil à niveau d'eau, 337. — Sifflet d'alarme, 337. — Soupape de sûreté, 338. — Autres pièces de la chaudière, 338. — Locomotive, 338.
Calcul du travail des machines a vapeur. — Problèmes à résoudre, 339. — Travail produit par la combustion du charbon, 341.
II. — Chauffage et ventilation des lieux habités — Chauffage par les cheminées, 342.

Calorifère à air chaud, 345. — Calorifères par circulation d'eau chaude, 346. — Chauffage à la vapeur, 347. — Poêles, 348. — Poêles calorifères, 348 — Données numériques concernant le chauffage et la ventilation, 350.

CHAPITRE VII. — Notions de météorologie.

Température de l'air, 352. — Température moyenne du jour, 353. — Température moyenne du mois et de l'année, 354. — Résultats généraux concernant les variations de la température en un même lieu du globe, 354. — Température à diverses profondeurs dans la terre, 355. — De la température en divers lieux du globe, 355. — Climats. — Lignes isochimènes. — Lignes isothères, 357. — Influence exercée sur la température d'un lieu par la fréquence des pluies, par les vents, par la proximité de la mer, 358. — Influence due à l'altitude, 359. — Variations de la pression atmosphérique, 359. — Changements dans la valeur de la pression moyenne de l'atmosphère, avec la latitude, 360. — Influences exercées par le beau et le mauvais temps, 360. — Des vents, 360. — Vents réguliers. — Brise de mer; brise de terre, 361. Vents alizés. — Moussons, 362. — Vents irréguliers, 362.

Météores aqueux. — Nuages, 363. — Brouillards, 364. — Pluie, 364. — Udomètres, 364. — Neige, 365. — Rosée, 365.

LIVRE QUATRIÈME

Électricité

CHAPITRE I. — Notions préliminaires.

Premiers phénomènes, 367 — Expérience de Gray, 367. — Fluide électrique, 368. — Corps bons conducteurs, corps mauvais conducteurs, 368. — Corps isolants, 369. — Tous les corps s'électrisent par le frottement, 369. — Hypothèse des deux fluides électriques, 370. — Fluide neutre, 371. — Balance de Coulomb, 372. — Loi des attractions, 373. — L'électricité se porte à la surface des corps, 375. — L'électricité s'accumule sur les pointes, 377.

CHAPITRE II. — Électricité développée par influence.

Appareil, 378. — Première expérience, 379. — Ligne neutre, 379. — La décomposition a une limite, 380. — Le cylindre est touché, 380. — On rompt toute communication avec le sol, 381. — Influence exercée sur un corps électrisé, 382. — Électricité développée par influence sur les corps mauvais conducteurs, 383. — Influence exercée sur plusieurs conducteurs placés les uns à la suite des autres, 383. — Mouvement des fluides sur un corps soumis à l'influence chimique, 384.

Premières applications de la théorie précédente. — Communication de l'électricité, 384. — Communication avec le sol, 385. — Pouvoir des pointes, 385. — Attraction des corps légers, 386.

Étincelle. — Production de l'étincelle, 387. — Aspect, 387. — Chaleur, 388. — Passage à travers les corps mauvais conducteurs, 388. — Combinaisons produites par l'étincelle, 389. — Décomposition chimique, 391.

Machines électriques. — Machine d'Otto de Guericke, 392. — Machine électrique à plateau, 392. — Machine d'Armstrong, 394 — Électrophore, 395.

Électroscope à lames d'or, 397.

CHAPITRE III. — Condensateurs.

Historique, 400. — Première expérience avec le condensateur, 402. — Conséquences de cette première expérience, 402. — Théorie du condensateur, 403. — Limite de la charge, 404. — Force condensante, 404. — Que doit-on entendre par l'expression électricité dissimulée? 404. — Décharges successives, 405. — Décharge instantanée, 405. — Mouvement d'électricité sur l'excitateur, 406. — Carreau de Leyde, 406. — Bouteille de Leyde, 407. — Expérience de Franklin, 407. — Figures de Lichtenberg, 408. — Les électricités se portent sur la lame isolante, 408. — Batterie, 409. — Diverses expériences, 410. — Électroscope condensateur, 412.

CHAPITRE IV. — Électricité atmosphérique.

Premières idées sur l'identité entre la foudre et l'électricité. — Expérience de Dalibard, 413. — Expériences de Franklin et de Romas, 414. — Méthodes actuelles d'observation, 414. — Carillon électrique, 415. — Causes de l'électricité atmosphérique, 416. — Éclair, 417. — Tonnerre, 419. — Effets de la foudre, 420. — Choc en retour, 422. — Paratonnerre, 423. — Tige, 424. — Conducteur, 424. — Cercle de protection, 425.

MAGNÉTISME.

Notions préliminaires. — Pierre d'aimant. — Aimants artificiels, 425. — Pôles et ligne neutre, 427. — Points conséquents, 428. — Direction et orientation de l'aiguille aimantée. — Action mutuelle des deux pôles, 428. — Noms donnés aux pôles, 429. — Différence entre l'acier et le fer doux. — Force coercitive, 430. — Hypothèse des deux fluides magnétiques. — Fluide neutre, 431. — Effet produit par la rupture d'un barreau aimanté, 432

Magnétisme terrestre. — Couple terrestre, 434. — Déclinaison. — Inclinaison, 435. — Décomposition de la force magnétique du globe en trois composantes, 436. — Mesure de la déclinaison, 438. — Mesure de l'inclinaison, 441. — Variation de la déclinaison dans un même lieu, 443. — Variation de l'inclinaison en un même lieu, 444. — Boussole marine, 444. — Compensateur de Barlow, 445. — Loi des répulsions et des attractions magnétiques, 446.

Procédés d'aimantation. — Méthodes diverses, 448. — Aimantation par l'action de la terre, 451. — Circonstances qui influent sur le degré d'aimantation de l'acier, 452. — Armatures des aimants, 452. — Substances magnétiques, 453.

ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE I. — Pile voltaïque.

Expérience de Galvani, 453. — Pile de Volta, 455. — Pôles, 455. — Courant, 456. — Rhéophores, 456. — Pile à auge, 456. — Pile à couronne, 457. — Règle pour reconnaître les pôles d'une pile, 458. — Pile de Wollaston, 459.

II. Quelques effets chimiques des piles. — Décomposition de l'eau acidulée, 459. — Décomposition des sels métalliques, 460.

III. Piles a courant constant. — Zinc amalgamé, 461. — Courant intérieur de la pile, 461. — Modifications subies par une pile en activité, 461. — Pile de Daniell, 463. — Pile de M. Marié Davy, 465. — Pile de Grove, 465. — Pile de Bunsen, 466. — Pile de Smee, 466.

CHAPITRE II. — Effets de la pile.

I. Effets physiques. — Étincelle, 467. — Chaleur produite par le courant, 468. — Comparaison du courant de la pile avec celui d'une bouteille de Leyde, 469. — Lumière électrique, 470. — Transport par le courant, 471. — Autres effets physiques de la pile, 472.

II. Effets chimiques. — Décomposition de l'eau, 472. — Théorie de Grotthuss, 472. — Décomposition des sels métalliques, 473. — Décomposition des sels alcalins et terreux, 474. — Corps décomposables par le courant, 476. — Équivalents électro-chimiques. Faraday, 476. — Extension de la loi de Faraday aux actions produites à l'intérieur de la pile, 478. — Chaleur dégagée à l'intérieur de la pile. — M. Joule, 479. — M. Favre, 480. — Application des lois précédentes, 481. — Origine chimique de l'électricité voltaïque, 482. — Décompositions chimiques produites avec la machine électrique, 483.

Applications chimiques de la pile. — Découverte du potassium, 484. — Préparation des métaux terreux, 484. — Préparation du chrôme et du manganèse, 485. — Dorure, 485. — Argenture, 487. — Galvanoplastie, 487. — Courant à employer, 488 — Appareil simple, 488. — Cuve de galvanoplastie, 489. — Résultats obtenus, 489.

Effets physiologiques. — Premières actions connues, 491. — Action sur le nerf, 491. — Action sur le muscle, 492. — Courants des muscles et des nerfs, 492. — Excitation spéciale de l'électricité, 493. — Applications médicales, 493.

CHAPITRE III. — Expérience d'Œrsted, galvanomètre.

Expérience d'Œrsted. — Historique, 494 — Expérience, 494. — Énoncé d'Ampère, 495.

Galvanomètre. — Principe, 496. — Construction, 497. — Galvanomètre à aiguilles astatiques, 498. — Sensibilité du galvanomètre, 500. — Polarisation des électrodes, 500. — Pile à gaz de Grove, 501.

CHAPITRE IV. — Intensité des courants.

L'intensité d'un courant diminue quand la longueur du circuit augmente, 502. — Sens qu'il faut attacher à cette expression : intensité d'un courant, 503. — Mesure des intensités des courants, 503. — Conductibilité. — Résistance, 505. — Unité de résistance, 505. — Mesure des résistances, 507. — Loi des longueurs, 508. — Résistances spécifiques. — Conductibilité, 508. — Loi des sections, 508. — Résistance d'un fil quelconque, 509 — Résistance des liquides, 509. — Loi d'Ohm, 510. — Formule, 511. — Réunion de plusieurs éléments, 512. — Éléments associés par les pôles de même nom, 514. — Choix d'un galvanomètre, 515.

CHAPITRE V. — Aimantation par les courants. — Télégraphes électriques.

Action du courant sur la limaille de fer, 516. — Aimantation par les courants, 516. — Points conséquents, 517. — Aimantation du fer doux, 517. — Electro-aimant, 518. —

Magnétisme et diamagnétisme, 519. — Emploi des électro-aimants comme moteurs, 519. — Chaleur consommée par le travail des électro-moteurs, 521. — Appréciation de ces machines, 521.

Télégraphes électriques. — Principe du télégraphe électrique, 523. — Communication avec la terre, 523. — Télégraphe de Morse. — Récepteur, 524. — Manipulateur, 527. — Installation d'un poste, 527. — Télégraphe de Bréguet, 529. — Manipulateur, 530. — Avantages des systèmes décrits, 531. — Autres espèces de télégraphes, 531. — Fil de ligne, 532. — Câble sous-marin, 532. — Perturbations, 533.

CHAPITRE VI. — Actions des courants sur les courants.

Historique, 533. — Courant mobile, 534. — Commutateur, 534. — Premiers phénomènes, 535. — Action d'un courant horizontal indéfini sur un courant horizontal limité et mobile autour d'un axe vertical, 538. — Action d'un courant circulaire horizontal sur un courant rectiligne, horizontal et limité, mobile autour d'un axe vertical passant par le centre d'un courant circulaire, 539. — Appareil. — Expérience, 541 — Action d'un courant horizontal indéfini sur un courant vertical mobile autour d'un axe vertical, 541. — Action d'un courant circulaire, fixe et horizontal sur un courant vertical, limité et mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du courant circulaire, 543. — Expérience, 544. — Action de la terre sur les courants, 544. — Courants astatiques, 547. — Courants circulaires mobiles, 548. — Solénoïdes, 548. — Nouvelle théorie des aimants, 550. — Sens du courant du solénoïde auquel un aimant est assimilé, 551. — Actions des courants produits par la décharge d'une bouteille de Leyde, 552. — Rotation d'un courant par un aimant, 553. — Rotation d'un aimant par un courant, 553.

CHAPITRE VII. — Induction.

Historique, 555. — Induction par les courants, 556. — Appareil, 556. — Induction par les aimants, 558. — Loi de Lenz, 559. — Induction d'un courant sur lui-même, 559. — Intensité et tension des courants induits, 561. — Induction produite par un aimant sur un disque en mouvement, 561. — Induction par l'action de la terre, 562. — Induction Leyde-électrique, 562. — Courants induits de différents ordres, 562. — Machine de Masson, 563. — Machine de M. Ruhmkorff, 563. — Machine de Pixii, 566. — Machine de Clarke, 566.

CHAPITRE VIII. — Courants thermo-électriques.

Expérience de Seebeck, 570. — Emploi du galvanomètre, 570. — Série thermo-électrique, 571. — Interversion du courant aux diverses températures, 571 — Intensité des courants produits, 571. — Courants thermo-électriques obtenus avec un seul métal présentant un défaut d'homogénéité, 572. — Piles thermo-électriques, 573. — Effets de ces piles, 574. — Pile de M. Pouillet, 574. — Pyromètre de M. Pouillet, 575. — Pile de Nobili et Melloni, 575. — Graduation. — Arc d'impulsion, 576. — Pince thermo-électrique, 576.

LIVRE CINQUIÈME

Acoustique

CHAPITRE I. — Actions moléculaires.

Forces moléculaires, 577. — Adhésion. Cohésion, 577. — Phénomènes capillaires, 578. — Lois expérimentales de la capillarité, 579. — Vérification de la loi de Jurin, 580. — Compressibilité des solides, 581. — Compressibilité des liquides, 582. — Appareil d'Œrsted, 582. — Perfectionnement de la méthode, 581. — Choc des corps, 584.

CHAPITRE II. — Production et propagation du son.

I. Production du son. — Vibration d'un corps sonore, 586. — Ventres, nœuds, 587. — Vibration simple, vibration double, 587. — Production du son par les liquides, 589. — Production du son par les gaz. Colonne d'air vibrante, 589.

II. — Propagation du son. — Le son ne se propage pas à travers le vide, 590. — Les solides transmettent le son, 590. — Les liquides transmettent le son, 591. — Vitesse du son dans l'air, 591. — Vitesse du son dans les liquides, 592. — Vitesse du son dans les corps solides, 593.

III. Théorie de la propagation du son. — Vibrations des milieux qui propagent le son, 593. — Dilatations et condensations, 595. — Propagation des mouvements vibratoires, 596. — Ondes sonores, 597. — Représentation graphique des condensations et des dilatations, 597. — Longueur d'ondulation, 598. — Vitesse des molécules vibrantes, 598. — Propagation dans un milieu indéfini, 599. — Réflexion du son, 599.

CHAPITRE III. — Qualités du son.

Intensité, 601.

Hauteur du son. — Nombre de vibrations correspondant a un son donné. — Sirène, 602. — Roue dentée, 605. — Méthode graphique, 605. — Nombres de vibrations correspondant aux diverses notes de la gamme, 606. — *La* normal, 606. — Limite des sons perçus, 607. — Limites de la voix humaine, 607. — Accord parfait, 608. — Tons, demi-tons, 608. — Dièses et bémols, 609. — Tempérament, 610. — Nouvelle méthode pour déterminer le nombre de vibrations qui correspond à un son donné, 610.

Timbre, 611.

CHAPITRE IV. — Vibrations des cordes et des tuyaux.

I. Vibrations des cordes. — Sonomètre, 613. — Loi des longueurs, 613. — Loi des diamètres, 614. — Loi des tensions, 615. — Loi des densités, 615. — Formule, 616. — Harmoniques, 616. — Vibrations longitudinales des cordes, 618.

II. Vibrations des tuyaux sonores. — Embouchure, 618. — L'air vibre dans un tuyau sonore. Preuve expérimentale, 619. — Influence des parois, 619. — Loi des dimensions homologues, 619. — Variation de densité du gaz à la région du nœud. Existence des ventres de vibration, 621. — Tuyaux ouverts. — Hauteur du son fondamental, 623. — Loi des longueurs, 623. — Harmoniques, 624. — Tuyaux fermés, 625. — Loi des longueurs, 625. — Sons rendus par les tuyaux fermés, 626. — Restriction à introduire dans les résultats précédents, 626.

CHAPITRE V. — Vibrations des verges et des plaques.

I. Vibrations des verges. — Vibrations longitudinales, 627. — Verges libres aux deux bouts, 628. — Loi des longueurs, 629. — Sons harmoniques, 629. — Verges fixées à un bout, 629. — Vibrations transversales des verges, 629. — Diapason, 629.
II. Vibrations des plaques. — Loi des épaisseurs, 630. — Loi des surfaces, 631. — Loi des dimensions homologues, 631.

CHAPITRE VI. — De l'ouïe.

Anatomie de l'oreille, 632. — Usages des diverses parties de l'oreille, 634.

LIVRE SIXIÈME

Optique

CHAPITRE I. — Préliminaires.

Corps lumineux; corps transparents; corps opaques, 637. — Propagation de la lumière, 638. — Ombre, 638. — Pénombre, 639. — Chambre noire, 640. — Vitesse de la lumière. Roemer, 642. — Méthode de M. Fizeau, 644. — Intensité de la lumière, 646.
Photométrie. — Principe sur lequel repose la construction des photomètres, 648. — Photomètre de Rumford, 648. — Photomètre de Bunsen. — Son principe, 650. — Photomètre de poche, 650. — Photomètre de M. Burel, 651.

CHAPITRE II. — Réflexion.

Lois de la réflexion, 653. — Démonstrations. 655. — Miroirs plans, 655. — Image d'un objet, 656. — Miroirs faisant un angle, 657. — Diverses espèces de miroirs plans, 659 — Porte-lumière, 659.
Miroirs sphériques concaves. — Définition, 660. — Axe principal, 660. — Foyer principal, 661. — Aberration de sphéricité, 661. — Mesure de la distance focale d'un miroir, 663. — Foyers conjugués, 664. — Discussion géométrique, 664. — Foyers virtuels, 665. — Formule, 666. — Discussion de la formule, 667. — Axes secondaires, 668. — Image des objets, 669. — Calcul de la grandeur relative de l'image et de l'objet, 672
Miroirs sphériques convexes. — Axe principal, foyer principal, foyers conjugués, 673. — Axes secondaires, 675. — Détermination des images, 675. — Objet virtuel, 676.

CHAPITRE III. — Réfraction.

Définition, 677. — Faits d'observation, 678. — Lois de la réfraction, 679. — Démonstration de Descarte, 681. — Valeur des indices de réfraction, 682. — Indice inverse de réfraction, 682. — Discussion de la formule, 682. — Angle limite, 684. — Réflexion totale, 685. — Réfraction atmosphérique, 686. — Mirage, 687. — Passage de la lumière à travers une lame à faces parallèles, 689. — Effets des prismes, 690.

CHAPITRE IV. — Lentilles.

Lentilles convergentes. — Axe principal, 693. — Foyer principal, 694. — Foyers conjugués, 695. — Axes secondaires, 695. — Image d'un objet, 697. — Image virtuelle, 698. — Formule, 698. — Grandeur des images, 701. — Mégascope, 701. — Microscope solaire, 702. — Chambre noire, 703.

Lentilles divergentes. — Foyer principal. Foyers conjugués, 705. — Centre optique. Axes secondaires, 707. — Tracé géométrique des images, 707. — Formule, 708. — Image d'un objet virtuel, 708.

CHAPITRE V. — Spectre solaire.

Décomposition de la lumière. — Expérience du spectre solaire, 709. — Théorie de Newton, 710. — Expériences à l'appui, 711-714.

Recomposition de la lumière. — 1° Première expérience, 716. — 2° Recomposition de la lumière blanche par une lentille convergente, 716. — 3° Expérience des prismes opposés, 717. — Homogénéité des couleurs du spectre, 718. — Couleur des corps, 718.

Raies du spectre. — Raies du spectre, 720. — Les raies caractérisent les diverses sources de lumière, 722. — Raies produites par les gaz, 722. — Raies brillantes des vapeurs métalliques, 724. — Pouvoir émissif et pouvoir absorbant d'une vapeur métallique. M. Kirchhoff, 723. — Applications de MM. Kirchhoff et Bunsen. Découverte de deux métaux, 726. — Métaux appartenant à l'atmosphère solaire, 726.

Actions diverses produites par le spectre solaire. — Intensité lumineuse, 727. — Effets calorifiques, 727. — Effets chimiques, 728. — Phosphorescence, 729.

Achromatisme. — Achromatisme des prismes, 731. — Achromatisme des lentilles, 733.

CHAPITRE VI. — Vision.

Description de l'œil, 735. — Les images se peignent sur la rétine renversées, 736. — Axe optique, 737. — Angle visuel, 737. — Distance de la vue distincte, 737. — L'œil peut s'accommoder pour voir à différentes distances, 738. — Myopie, 740. — Presbytie, 741. — Absence d'aberration de sphéricité, 742. — Vision binoculaire, 742. — Stéréoscope, 744. — Durée des impressions sur la rétine, 745. — Irradiation, 745. — Images consécutives, 746. — Couleurs subjectives, 746. — Tutamina oculi, 746.

CHAPITRE VII. — Instruments d'optique.

Chambre claire, 748. — Loupe, 751.

Microscope composé. — Théorie du microscope composé, 752. — Mode d'observation, 754. Grossissement, 755. — Achromatisme, 757. — Champ de l'instrument, 758.

Lunette astronomique — Théorie de la lunette, 758. — Dispositif, 759. — Grossissement, 760. — Champ, 761. — Axe optique, 762. — Achromatisme, 763. — Clarté des images, 764. — Lunette terrestre, 764. — Lunette de Galilée, 765.

Télescopes. — Télescope d'Herschell, 766. — Télescope de Newton, 767. — Télescope de M. Foucault, 767.

CHAPITRE VIII. — Daguerréotypie. — Photographie.

Première idée de la photographie, 769. — Propriétés photogéniques du chlorure d'argent,

770. — Progrès dus à Daguerre (daguerréotypie), 770. — Production des images sur les plaques métalliques, 771.

PHOTOGRAPHIE SUR PAPIER. — Indication générale des opérations, 773. — Formation de la couche sensible. — Emploi du collodion, 773.

I. PRÉPARATION DES LIQUEURS PHOTOGÉNIQUES POUR LES IMAGES NÉGATIVES. — Collodion ioduré, 774. — Bain d'argent, 775. — Liquide révélateur pour le développement de l'image, au sortir de la chambre obscure, 775. — Liqueur propre à renforcer l'image quand les noirs manquent de vigueur, 776. — Liqueur pour fixer l'image négative, 776.

II. PROCÉDÉ OPÉRATOIRE POUR LA PRODUCTION DES CLICHÉS, 776. — Chambre obscure. — Mise au point, 777. — Dépôt sur la glace du collodion ioduré, 778. — Sensibilisation de la couche de collodion, 778. — Exposition dans la chambre noire, 778. — Apparition de l'image négative, 778. — Fixage du cliché, 778.

III. ÉPREUVES POSITIVES. — PRÉPARATION DES LIQUEURS. — Bain d'argent, 779. — Bain pour le fixage et le virage de l'épreuve, 779.

IV. PROCÉDÉ OPÉRATOIRE POUR LE TIRAGE DES ÉPREUVES POSITIVES, 779. — COLLODION SEC. — Préparation du collodion sec, 780.

PROBLÈMES

SECTION I. — Lois de la pesanteur, 783.
SECTION II. — Principe de Pascal et ses conséquences, 786.
SECTION III. — Principe d'Archimède. — Corps flottants. — Poids spécifique, 787.
SECTION IV. — Pression atmosphérique. — Baromètre, 793.
SECTION V. — Loi de Mariotte. — Loi du mélange des gaz, et applications, 795.
SECTION VI. — Principe d'Archimède appliqué aux gaz. — Aérostats, 802.
SECTION VII. — Dilatation des solides, des liquides et des gaz, 805.
SECTION VIII. — Densité des gaz, 815.
SECTION IX. — Vapeurs. — Mélange des gaz et des vapeurs. — Liquéfaction des gaz, 818.
SECTION X. — Calorimétrie. — Chaleur spécifique et chaleur latente, 826.
SECTION XI. — Problèmes sur les autres parties de la chaleur, 835.
SECTION XII. — Problèmes sur l'électricité et sur le magnétisme, 837.
SECTION XIII. — Problèmes d'acoustique, 840.
SECTION XIV. — Problèmes d'optique, 841.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

CORBEIL, typographie et galvanoplastie de CRÉTÉ.